

НАУКОВІ НОТАТКИ

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)**

**Випуск 48
(січень-березень)
2015**

Луцьк 2015

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Божидарнік В.В., ректор, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Заболотний О.В., декан ТФ, Луцький НТУ, к.т.н., доцент; Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Рудь В.Д., зав. кафедри, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Шваб'юк В.І., керівник відділу, Луцький НТУ, д.т.н., професор.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рудь В.Д., зав. кафедри, професор, д.т.н., Луцький НТУ (відповідальний редактор); Пустюльга С.І., професор, д.т.н., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Заболотний О.В., доц., к.т.н., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Гулієва Н.М., асистент, Луцький НТУ (відповідальний секретар); Бобир М.І., директор інституту, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Божидарнік В.В., ректор, проф., д.т.н., Луцький НТУ; Гавриш А.П., професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Гевко Б.М., зав. кафедри, професор, д.т.н., Тернопільський НТУ; Лотиш В.В., доц., к.т.н., Луцький НТУ; Майстренко А.Л., зав. відділом, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів; Максимович В.М., зав. кафедри, професор, д.ф.-м.н., Луцький НТУ; Пальчевський Б.О., зав. кафедри, професор д.т.н., Луцький НТУ; Петраков Ю.В., зав. кафедри, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Петровський В.Я., зав. відділом, проф., д.т.н., Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Повстяной О.Ю., доц. к.т.н., Луцький НТУ; Струтинський В.Б., зав. кафедри, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Шваб'юк В.І., зав. відділом, професор, д.т.н., Луцький НТУ; Штерн М.Б., зав. відділом, член-кореспондент НАН України, с.н.с., д.т.н., Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Ярошевич М.П., зав. кафедри, професор, д.т.н., Луцький НТУ.

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № від 2015 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:

Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказ МОН України № 528 від 12.05.2015 року та в наукометричну базу РИНЦ.

ISSN: 978-617-672-039-3

ШАНОВНІ ДОПISУВАЧІ, КОЛЕГИ!

Редакційна колегія має сподівання, що матеріали збірника викличуть інтерес дослідників як в Україні, так і за її межами, сприятимуть розширенню зацікавленого професійного обговорення актуальних проблем прикладної геометрії, удосконаленню методики графічної підготовки студентів, педагогічних досліджень, подальшому згуртуванню дослідницького активу.

Даний випуск міжвузівського збірника "Наукові нотатки" містить матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції «Дослідження можливостей використання інноваційних технологій у науковій роботі з прикладної геометрії та навчальному процесі кафедр ВНЗ, що займаються графічною підготовкою студентів», яка відбулася в м. Луцьку 28-29 квітня 2015 року на базі Луцького національного технічного університету. Статті подано в авторській редакції.

Учасниками всеукраїнської науково-методичної конференції було заявлено близько 30 доповідей вітчизняних дослідників. Результати, що були представлені по проблемам геометричного, математичного та комп'ютерного моделювання явищ і процесів, по теоретичним аспектам прикладної геометрії, по моделюванню в технічній естетиці та дизайні, по комп'ютерних технологіях та графіці можуть успішно застосовуватися при розв'язуванні задач механіки деформівного твердого тіла, при аналізі структур та морфології нових матеріалів.

Редакційна колегія міжвузівського збірника "Наукові нотатки" висловлює сподівання, що опубліковані матеріали сприятимуть активізації зацікавленого обговорення фахівцями актуальних проблем досліджень, розширенню їх тематичного діапазону, впровадженню нових дослідницьких підходів і методик, подальшому згуртуванню дослідників.

Збірник праць "Наукові нотатки" завжди відкритий для актуальних публікацій, аналітичних оглядів і наукових дискусій. А всім авторам хочемо побажати творчого натхнення й результативності здійснення наукового пошуку.

Довідки за тел. (0332) 26-25-19 e-mail: notatki@meta.ua

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56
Луцький національний технічний університет,
редакція міжвузівського збірника "Наукові нотатки"

З повагою,

*Голова редакційної ради,
ректор Луцький НТУ, професор*

В. В. Божидарнік

*Відповідальний редактор,
професор Луцький НТУ*

В. Д. Рудь

ЗМІСТ

Зміст	4
Азарков О. Ю. Моделювання поверхонь з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних напрямів і заданими кутами нахилу дотичних до них в їх кінцевих точках	8
Аушева Н. М. Моделювання плоских сіток на основі ізотропних кривих за Годографом Піфагора	13
Бабка В. М. Зміна напрямку обертання відрізка без його зупинки	18
Бідніченко О. Г. Геометричні особливості конструювання проточних частин відцентрових компресорів	23
Бондаренко А. І. Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів в гідрооб'ємно-механічних трансмісіях	28
Борисенко В. Д., Устенко І. В. Модифікація сплайнових кривих CATMULL-ROM	36
Бумага А. І. Розрахунковий алгоритм визначення залежності межі міцності при стисканні дрібнозернистого дьогтебетону в залежності від 4-х параметрів	41
Вірченко Г. І. Динамічне варіантне формоутворення ліній, поверхонь і тіл методом поліпараметризації.....	45
Влах В. В. Дослідження механізмів поліграфічних та пакувальних машин в спеціалізованій системі автоматизованого проектування.....	49
Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Кучеренко В. В., Бездітний А. О. Розробка технології формотворення та обробки динамічних поверхонь.....	54
Гадай А. В. Автоматична система штучного освітлення з керуванням за колірною температурою.....	59
Гадай А. В. Динамічна компенсація реактивної потужності регульованих електроприводів бурових установок	63
Гарматюк Р. Т., Чихіра І. В. Полімеркомпозиційні покриття для захисту деталей відцентрових насосів.....	68
Громко Л. С., Пустюльга С. І., Клак Ю. В. Метод знаходження парето-оптимальних розв'язків багатокритеріальних оптимізаційних задач	72
Залога В. О., Денисенко Ю. О., Івченко О. В., Динник О. Д. Нормалізація техніко-економічних показників інструментального виробництва на основі застосування теорії нечітких множин	78
Золотова А. В. Дискретна одновимірна кускова інтерполяція при комбінованому розподілі зовнішнього навантаження	86
Ісмаїлова Н. П. Сопряженных квазивинтовых поверхностей исключают интерференцию параметрическое определение характеристики	90
Кищун В. А., Заць О. Г. Сучасні методи діагностування дизельних паливних форсунок системи живлення COMMON RAIL	93
Колосова О. П. Геометричне та математичне моделювання процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими	100
Комяк В. М., Соболев О. М., Чапля Ю. С. Метод оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями у прямокутній області змінної довжини	107
Конопацький Е. В. Особенности вычисления обобщённых тригонометрических функций.....	112
Коробко І. В., Писарець А. В. Вплив гаусової кривизни поверхні чутливого елемента і гідродинамічних характеристик потоку на метрологічні показники перетворювачів витрати ...	116
Крадінова Т. А. Математична модель розрахунку довговічності пластини з періодичною системою компланарних тріщин в умовах дії довготривалого статичного розтягу і низькотемпературного поля	120
Крысько А. А. Вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм методами БН-исчисления	125
Літницький С. І. Наближене визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом твірних	130

<i>Марціаш О. М., Мурований І. С., Павлюк В. І.</i> Лабораторний стенд для визначення деяких характеристик роботи автомобільних амортизаторів	135
<i>Мисковець С. В., Савчук П. П.</i> Фізико-хімічна взаємодія матеріалів при терті пари сталь-бронза.....	140
<i>Мороз І. А.</i> Особливості формування просторової структури суспензійних осадів	145
<i>Мостовенко О. В.</i> Суперпозиції дискретно поданих поверхонь (ДПП) на сітці з прямокутними або квадратними у плані клітинами	151
<i>Муквич М. М.</i> Конструювання мінімальних поверхонь за допомогою ізотропної кривої, яка лежить на конусі	155
<i>Онисько О. Р., Зубик О. В.</i> Програмна реалізація визначення величини опуклості гіперболічного профілю різьбового різця з ненульовим значенням переднього кута	159
<i>Пилипака С. Ф., Несвідомін А. В.</i> Моделювання руху частинки по шорсткій поверхні однопорожнинного гіперболоїда обертання	167
<i>Пилипака Т. С.</i> Вдосконалення форми спіральної пружини	172
<i>Рудь В. Д., Савюк І. В., Самчук Л. М., Повстяна Ю.С.</i> Експериментальне дослідження впливу геометрії ріжучого інструмента та швидкості різання на технологічні параметри токарної обробки	176
<i>Рудь Н. Т., Кушнірук С. І., Мартинюк О. І.</i> Інформаційне забезпечення інноваційного розвитку економіки.....	183
<i>Севостьянов І. В.</i> Вібродарне зневоднення відходів харчових виробництв	195
<i>Семків О. М., Сухарькова О. І.</i> Наближене визначення критичних значень параметрів фазових траєкторій рівнянь маятникових коливань	204
<i>Скачков В. А., Иванов В. И., Нестеренко Т. Н., Бережная О. Р.</i> Адаптивное управление температурным режимом автоклавного отверждения углепластиковых заготовок	211
<i>Сліпчук А. М.</i> Перспективи розвитку САЕ-систем	216
<i>Шарко А. В., Нигалатий В. Д., Рожков С. А., Букетов А. В.</i> Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов	220
<i>Шолом П. С., Михалевич В. Т.</i> Математичне моделювання індуктивних перетворювачів з використанням методу аналогій	225
<i>Шемет В. Я.</i> Одержання нових сполук халькогенідних систем	230

ONTENTS

Contents	4
Agarkov O. Ju. Surface modeling with linear distribution of curvature along the main directions and the given angles tangent to them at their endpoints.....	8
Ausheva N. N. Modeling of planar grids based on isotronic curves by Pythagorean Hodograph	13
Babka V. M. Veering of twirl of a segment without its stop	18
Bidnichenko O. H. Geometric design features of flowing parts of centrifugal compressors	23
Bondarenko A. I. Comparative analysis of results of experimental and theoretical researches of working processes in hydrostatic-mechanical transmission	28
Borisenko V. D., Ustenko I. V. Modification spline curves CATMULL-ROM	36
Bumaga A. I. Calculation algorithm for determining the compressive strength of fine-grained tarmacadam depending on 4 parameters	41
Virchenko G. I. Dynamic variant shaping of lines, surfaces and solids by polyparameterization method	45
Vlakh V. V. Research mechanisms of printing and packing machines in specialized computer aided design.....	49
Gavrilenko Eu. A., Kholodnyak Yu. V., Kycherenko V. V., Bezditniy A. O. Development of technology for shaping and processing of dynamic surfaces	54
Gadai A. V. Automatic system of artificial lighting controlled by color temperature	59
Gadai A. V. The dynamical reactive power compensation of adjustable electric drilling rigs	63
Garmatiuk R. T., Chyhira I. V. Polimerkompozytsiyni coatings for protection of details centrifugal pumps.....	68
Hromko L. S., Pustiulha S. I., Klak U. V. Method of pareto-optimal search the solution of multicriteria optimization problems	72
Zaloga V. O., Denysenko Y. O., Ivchenko O. V., Dunnyk O. D. Normalization of technical and economic indicators of tool production through the application of fuzzy sets theory	78
Zolotova A. V. Discrete one-dimensional piecewise interpolation with a combined external load distribution	86
Ismailova N. P. Parametric certain characteristics connected quasi helical surface eliminates interference	90
Kyshchun V. A., Zaiets O. G. Modern methods of diagnosis for diesel fuel injector system power COMMON RAIL	93
Kolosova E. P. Geometric and mathematical modeling of the impregnation process of oriented fibrous fillers by liquid polymeric binders	100
Komyak V. M., Sobol O. M., Chaplya Yu. S. The method of optimum placement not oriented plane geometric objects with sectional nonlinear frontiers in rectangular area with varying length	107
Konopatskiy E. V. The features of calculating generalized trigonometric functions.....	112
Korobko I. V., Pysarets A. V. The sensitive element surface gaussian curvature and flow hydrodynamic characteristics influence on flowmeters metrological performances	116
Kradinova T. A. A mathematical model of calculating of the lifetime of plates with a periodic system of coplanar cracks in conditions of action of long-term static tension and low temperature field	120
Krysko A. A. Computational algorithm of forming of geometrical models of actual surface of the thin-walled shells of technical forms by methods of BN-calculation	125
Litnitskiy S. I. Axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines	130
Martsiyash O. M., Murovanyi I. S., Pavlyuk V. I. The laboratory stand to determine certain characteristics of the work automotive shock absorbers	135
Myskovets S., Savchuk P. Physicochemical interaction of materials in friction couple steel-bronze... ..	140
Moroz I. A. Specifics of the formation of the spatial structure of the suspensions precipitates	145
Mostovenko A. V. Superposition of discrete cast surfaces (DCS) on the grid with rectangular or square in terms of cells	151
Mukvich M. M. Construction of minimal surfaces using isotropic curve that lies on the cone	155

Onysko O. R., Zubyk O. V. Software implemeting determination of the hyperbolic profile convex magnitude of the non-zero rake angle threading tool cutting edge	159
Pylypaka S. F., Nesvidomin A. V. Simulation of particle motion rough surface one-sheeted hyperboloid	167
Pylypaka T. S. Refinement of the form of a spiral spring	172
Rud' V., Saviuk I., Samchuk L., Povstyana Y. Experimental study of geometry cutting tools and speed on the technological parameters turning	176
Rud' N., Kushniruk S., Marchuk O. Information support of innovative development.....	183
Sevostyanov I. V. Vibro-blowing dehydration of a waste of food manufactures	195
Semkiv O. M., Sukharkova E. I. Close determination of critical values of parameters of phase trajectories of equalizations of pendulum vibrations	204
Skachkov V. A., Ivanov V. I., Nesterenko T. N., Berezhnaya O. R. Adaptive control by temperature condition for autoclave consolidation of coalplastic material blanks	211
Slipchyk A. M. Development of CAE-systems in the future	216
Scharco A. V., Nihalatiy V. D., Rozhkov S. A., Buketov A. V. The impact of changes in dislocation structure on the acoustic characteristics of materials	220
Sholom P. S., Mykhalevych V. T. Mathematical modeling of inductive transformers by analogies method	225
Shemet V. Ya. Reception of new compounds chalcogenide	230

УДК 514.18

О.Ю. Агарков

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
**МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ З ЛІНІЙНИМИ ЗАКОНАМИ РОЗПОДІЛУ
 КРИВИНИ ВЗДОВЖ ГОЛОВНИХ НАПРЯМІВ І ЗАДАНИМИ КУТАМИ НАХИЛУ
 ДОТИЧНИХ ДО НИХ В ЇХ КІНЦЕВИХ ТОЧКАХ**

У статті розглядається питання геометричного моделювання ділянок поверхонь з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних напрямів за умови, що задані кути нахилу дотичних до них в їх кінцевих точках.

Ключові слова: моделювання геометричне, поверхня, кривина, розподіл лінійний, напрями головні, кути нахилу дотичних.

Рис. 4. Літ. 9.

А.Ю. Агарков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЛИНЕЙНЫМИ ЗАКОНАМИ
 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВИЗНЫ ВДОЛЬ ГЛАВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
 И ЗАДАНЫМИ УГЛАМИ НАКЛОНА КАСАТЕЛЬНЫХ К НИМ
 В ИХ КОНЕЧНЫХ ТОЧКАХ**

В статье рассматривается вопрос геометрического моделирования участков поверхностей с линейными законами распределения кривизны вдоль главных направлений при условии, что заданы углы наклона касательных к ним в их конечных точках.

Ключевые слова: моделирование геометрическое, поверхность, кривизна, распределение линейное, направления главные, углы наклона касательных.

O.Ju. Agarkov

**SURFACE MODELING WITH LINEAR DISTRIBUTION OF CURVATURE
 ALONG THE MAIN DIRECTIONS AND THE GIVEN ANGLES TANGENT
 TO THEM AT THEIR ENDPOINTS**

The article discusses the geometric modeling of surfaces with a linear distribution along the principal directions of curvature, provided that the specified angles tangent to them at their endpoints.

Keywords: geometric modeling, surface, curvature, a linear distribution, the main direction, the angles of inclination of the tangent.

Постановка проблеми. Проектування й виготовлення виробів складної геометричної форми, що стало можливим також і завдяки появі новітніх технологічних процесів, нових матеріалів тощо, вимагає від фахівців з прикладної геометрії розробки нових підходів до моделювання поверхонь, які описують зовнішні й внутрішні обводи тих чи інших деталей, що входять до складу виробів технологічно складних галузей промисловості: авіаційної, автомобільної, суднобудівної, турбобудівної та інших. Незважаючи на те, що в сучасній літературі можна знайти достатньо методів геометричного моделювання різноманітних поверхонь, все ж таки і на цей час розробка нових підходів до їх моделювання є питанням актуальним. Останнім часом посилилася увага до моделювання поверхонь із застосуванням певних залежностей розподілу кривини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що при моделюванні плоских і просторових кривих ліній широко застосовуються лінійні, квадратичні, кубічні графіки розподілу кривини від довжини дуги. Для просторових кривих додатково розглядаються залежності скруту від довжини дуги. Висвітлення результатів подібних досліджень можна знайти в роботах таких фахівців як С.Ф. Пилипака, В.М. Несвідомін, С.А. Устенко та інших. Теоретичні основи моделювання поверхонь закладені в роботах фахівців з диференціальної геометрії [3, 6]. Серед робіт, присвячених розробці різноманітних методів опису поверхонь, можна виділити наступні [2, 4, 8]. Певний інтерес викликають публікації, в яких моделювання поверхонь виконується у системі супровідного тригранника напрямної кривої [6].

Застосування певних графіків розподілу кривини поширено на моделювання поверхонь. Так, у роботі [7] розглядається моделювання поверхонь з лінійним розподілом кривини вздовж двох головних напрямів, в ній показано, що, надавши тим чи іншим коефіцієнтам лінійних законів розподілу кривини певні значення, можна отримати деяку поверхню. Але в цій роботі не

ставилося питання побудови ділянки поверхні, яка проходила б через наперед задані точки простору.

Метою дослідження є подальший розвиток ідей моделювання ділянок поверхонь з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних їх напрямів, запропонованих у роботі [1]. На відміну від цієї роботи пропонується враховувати кути нахилу дотичних в кінцевих точках криволінійних координат, які обмежують ділянку поверхні, що моделюється.

Основні результати дослідження. Розглянемо ділянку деякої поверхні, показаної на рис. 1. На цьому рисунку під du і dv розуміються диференціали криволінійних координат u і v головних напрямів поверхні; кути $\varphi(u, v)$, $\theta(u, v)$ є кутами нахилу дотичних до головних напрямів поверхні в точці θ .

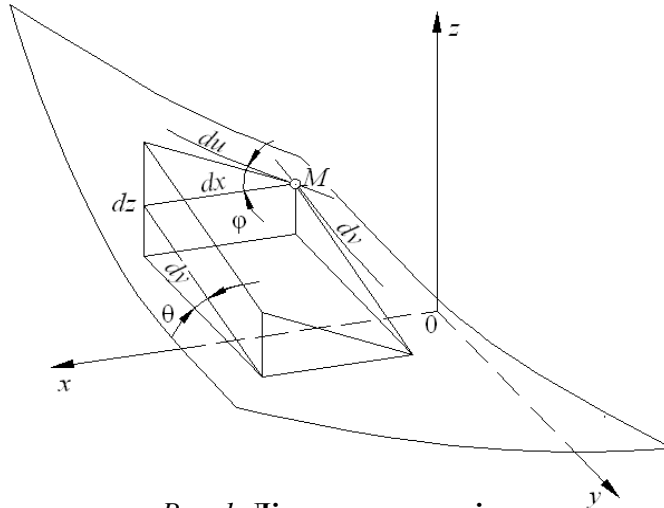


Рис. 1. Ділянка поверхні

З розгляду рис. 1 випливають наступні співвідношення:

$$dx = \cos \varphi(u, v) du;$$

$$dy = \cos \theta(u, v) dv;$$

$$dz = \sin \varphi(u, v) du + \sin \theta(u, v) dv .$$

Фрагменту поверхні, показаному на рис. 1, відповідають певні закони розподілу кривини $k_1(u, v)$ і $k_2(u, v)$, які залежать від значень криволінійних координат u і v .

З теорії диференціальної геометрії [4, 7] відомо, що кривина поверхні дорівнює швидкості зміни кутів нахилу дотичних φ та θ до головних її напрямів, тобто:

$$\frac{d\varphi}{du} = k_1(u, v); \quad \frac{d\theta}{dv} = k_2(u, v).$$

Інтегруванням цих виразів визначають залежності для розрахунку кутів нахилу дотичних до головних напрямів поверхні u і v в довільній її точці:

$$\varphi(u, v) = \varphi_0 + \int_0^u k_1(u, v) du ;$$

$$\theta(u, v) = \theta_0 + \int_0^v k_2(u, v) dv ,$$

де φ_0 і θ_0 – кути нахилу дотичних до головних напрямів поверхні при нульових значеннях криволінійних координат u і v , відповідно.

Параметричне рівняння поверхні матиме вигляд:

$$x(u, v) = x_0 + \int_0^u \cos \varphi(u, v) du ;$$

$$y(u, v) = y_0 + \int_0^v \cos \theta(u, v) dv ;$$

$$z(u, v) = z_0 + \int_0^u \sin \varphi(u, v) du + \int_0^v \sin \theta(u, v) dv. \quad (1)$$

Розглянемо геометричне моделювання поверхні за умови, що її кривина вздовж криволінійних координат u і v буде змінюватися за лінійними законами:

$$k_1(u, v) = a_1 u + b_1 v + c_1; \quad (2)$$

$$k_2(u, v) = a_2 u + b_2 v + c_2, \quad (3)$$

де $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – коефіцієнти лінійних розподілів кривини вздовж головних напрямів поверхні, які підлягають визначенню при її геометричному моделюванні.

Для лінійних законів розподілу кривини (1) і (2) формули для обчислення кутів нахилу дотичних до головних напрямів поверхні матимуть наступний вигляд:

$$\varphi(u, v) = \varphi_0 + u \left(\frac{a_1 u}{2} + b_1 v + c_1 \right); \quad (4)$$

$$\theta(u, v) = \theta_0 + v \left(a_2 u + \frac{b_2 v}{2} + c_2 \right). \quad (5)$$

Координати x, y і z будь-якої точки поверхні можна розрахувати, якщо будуть визначені коефіцієнти $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ законів розподілу кривини.

Розглянемо розв'язання задачі визначення невідомих коефіцієнтів лінійних законів розподілу кривини (4) і (5) для ділянки поверхні, показаної на рис. 2. Відомі координати чотирьох точок, а також кути нахилу дотичних φ_0 і θ_0 вздовж криволінійних координат в початковій (нульовій) точці.

Поставлену задачу моделювання поверхні з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних напрямів будемо розв'язувати за алгоритмом, запропонованим в роботі [1], в якій розглянуто метод моделювання поверхонь з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних напрямів і заданими кутами нахилу дотичних тільки в початковій точці. Але при цьому до уваги не приймалося те, що у точках 1 і 2 (рис. 2) були забезпечені задані кути нахилу дотичних до головних напрямів поверхні.

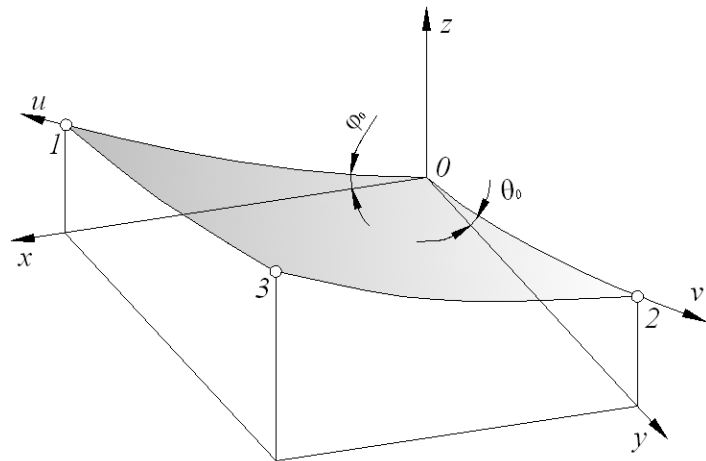


Рис. 2. Опорні точки ділянки поверхні

Розв'яжемо задачу моделювання поверхонь з лінійними законами розподілу їх кривини та заданими кутами нахилу дотичних в $0, 1$ і 2 точках. Тобто, в точці 0 відомі кути φ_0 і θ_0 , в точці 1 відомий кут φ_1 , а в точці 2 – θ_2 .

Задачу моделювання поверхні з лінійними законами розподілу кривини вздовж головних напрямів і відомими кутами в точках 1 і 2 будемо розв'язувати за наступним алгоритмом.

Крок 1. Проведення кромки $0-1$ ділянки поверхні через точку 1 , для якої криволінійна координата v дорівнює нулю. З виразу (4) випливає, що

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \frac{a_1 u_1^2}{2} + c_1 u_1, \quad (6)$$

де u_1 – криволінійна координата, яка відповідає точці 1 .

Зв'язок кутів φ_0 і φ_1 згідно з (6) дозволяє визначити невідомий коефіцієнт a_1 :

$$a_1 = \frac{2}{u_1^2} (\varphi_1 - \varphi_0 - c_1 u_1).$$

Наявність кута нахилу дотичної φ_1 до кромки $0-1$ в точці 1 зменшує кількість невідомих, які необхідно знайти для моделювання цієї кромки до двох. Це коефіцієнт c_1 закону розподілу

кривини та криволінійна координата u_1 . Їх визначення відбувається шляхом мінімізації відхилення проміжної точки, розрахованої з деякими значеннями невідомих величин, від точки 1 , що реалізується із застосуванням високо ефективного алгоритму мінімізації функції багатьох змінних, запропонованим в роботі [9]. Для кромки $0-1$ варіюватимуться будуть тільки координати x і z . При $v = 0$ визначення координати z спрощується, оскільки при цьому значенні криволінійної координати v другий інтеграл у формулі (1) дорівнює нулю.

Крок 2. Проведення кромки $0-2$ ділянки поверхні через точку 2 , для якої криволінійна координата u дорівнює нулю. З виразу (5) випливає, що

$$\theta_2 = \theta_0 + \frac{b_2 v_2^2}{2} + c_2 v_2, \quad (7)$$

де v_2 – криволінійна координата, яка відповідає точці 2 .

Зв'язок кутів θ_0 і θ_2 згідно з (7) дозволяє визначити невідомий коефіцієнт b_2 :

$$b_2 = \frac{2}{v_2^2} (\theta_2 - \theta_0 - c_2 v_2).$$

Для побудови кромки $0-2$ необхідно визначити коефіцієнт c_2 і координату v_2 . При цьому варіюватимуться координати y і z поверхні. Координата z визначатиметься без врахування першого інтеграла виразу (1). За перше наближення криволінійної координати v_2 береться відстань між точками 0 і 2 .

Невідомі величини c_2 і v_2 також визначаються мінімізацією відстані між точкою 2 і деякою проміжною точкою, отриманою в результаті роботи алгоритму мінімізації функції багатьох змінних.

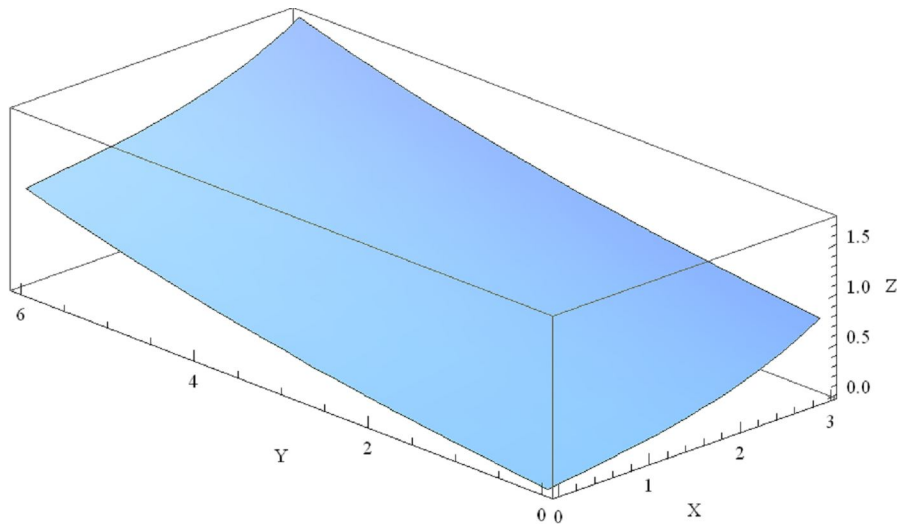


Рис. 3. Відсік поверхні

Крок 3. Визначення коефіцієнта a_2 за умови забезпечення проходження проекції кромки $2-3$ поверхні через горизонтальну проекцію точки 3 . На цьому кроці розглядається функція однієї змінної. При цьому мінімізується відхилення проекції на горизонтальну площину проекцій проміжної точки від проекції на цю ж площину точки 3 .

Крок 4. Визначення коефіцієнта b_1 , який має забезпечити проходження проекції кромки $1-3$ поверхні через горизонтальну проекцію точки 3 . На цьому кроці також мінімізується функція однієї змінної. Цільовою функцією виступає та ж сама функція, що й на попередньому кроці моделювання ділянки поверхні.

Отже, реалізація наведених вище чотирьох кроків запропонованого алгоритму геометричного моделювання поверхні, що підпорядковується лінійним законам розподілу кривини вздовж головних її напрямів, дозволяє визначити всі невідомі коефіцієнти, які необхідні для побудови ділянки поверхні з заданими кутами нахилу дотичних в точках 0 , 1 і 3 . Приклад отриманої поверхні показано на рис. 3.

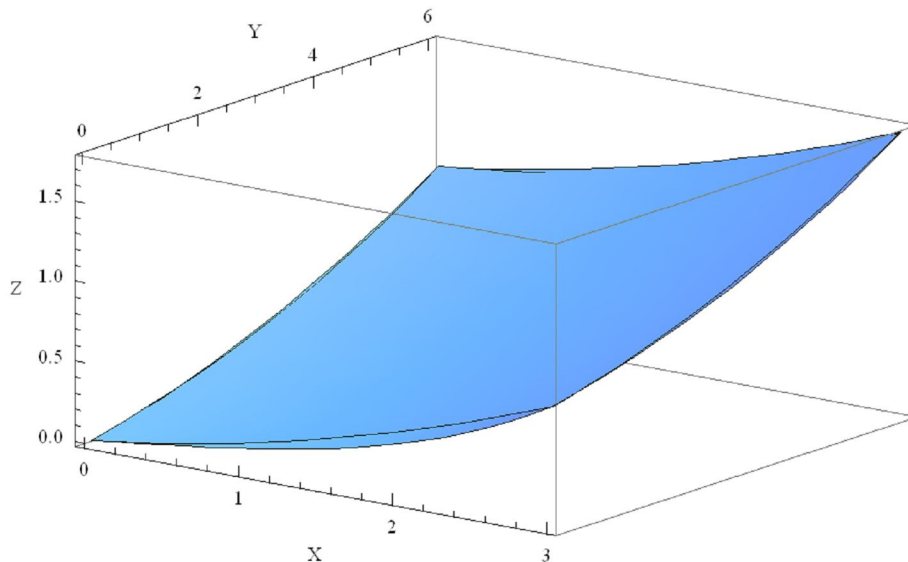


Рис. 4. Зіставлення поверхонь

На рис. 4 показані ділянки двох поверхонь, отриманих на підходах, запропонованих у цій статті та в роботі [1]. При візуалізації поверхонь було підібрано такий ракурс, який дозволив побачити різницю в геометрії кромки $\theta-1$. Саме вздовж координатної осі x відмічається різниця в кутах φ_1 в точці 1 . Кромка $\theta-1$ поверхні, змодельованої з урахуванням кутів нахилу дотичних в точках 1 і 2 , більш вигнута, тому ця ділянка поверхні, якщо можна так висловитися, знаходиться нижче ділянки поверхні, побудованої на положеннях роботи [1]. Відхилення ділянок поверхонь вздовж кромки $\theta-2$ менше, оскільки і різниця кутів θ_2 незначна.

Висновки. Введення до розгляду кутів φ і θ дозволяє впливати на геометрію поверхні, що моделюється. Вони є додатковими чинниками і дозволяють отримувати поверхні, які відповідають певним, наперед заданим, умовам.

1. Агарков О.Ю. Моделирование поверхности с линейными законами распределения кривизны вдоль главных її напрямів / О.Ю. Агарков // Сборник научных трудов Sworld. – Иванов: Маркова А.Д., 2014. – Выпуск 3 (36). – Том 3. – С. 3 – 10.
2. Иванов Г.С. Конструирование технических поверхностей / Г.С. Иванов. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
3. Норден А.П. Краткий курс дифференциальной геометрии / А.П. Норден. – М.: ГИФМЛ, 1955. – 244 с.
4. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей / В.А. Осипов. – М.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
5. Пилипака С.Ф. Конструювання лінійчатих поверхонь загального виду в системі супровідного тригранника напрямної просторової кривої / С.Ф. Пилипака, М.М. Муквич // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – Вип. 4. – Том 35. – С. 10–18.
6. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии / П.К. Рашевский. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 428 с.
7. Устенко С.А. Геометрична теорія моделювання криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їх параметрів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.01.01 "Прикладна геометрія, інженерна графіка" / Сергій Анатолійович Устенко; КНУБА. – К., 2013. – 40 с.
8. Farin G. Curves and surfaces for computer-aided geometric design / G. Farin. – Academic Press Inc., 1997. – [4-th edition]. – 447 p.
9. Hooke R. Direct search solution of numerical and statistical problems / R. Hooke, T.A. Jeeves // Journal of the ACM. – 1961. – Vol. 8, No 2. – P. 212 – 229.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2015 р.

УДК 514.7

Н. М. Аушева

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКИХ СІТОК НА ОСНОВІ ІЗОТРОПНИХ КРИВИХ ЗА ГОДОГРАФОМ ПІФАГОРА

У роботі пропонується застосувати для моделювання плоскої сітки ізотропну криву за годографом Піфагора (PH). Побудова сітки здійснюється на основі конформної та квазіконформної заміни параметра. Доведено, що при конформній заміні параметра сітка буде ортогональна та ізотермічна. Розраховано коефіцієнти першої квадратичної форми. Для розрахунків використовується крива, яка задана у комплексному просторі.

Ключові слова: ізотропна крива, крива за годографом Піфагора, плоска сітка, ортогональна сітка.

Рис. 1. Літ. 7

Н. Н. Аушева**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ СЕТОК НА ОСНОВЕ ИЗОТРОПНЫХ КРИВЫХ ПО ГОДОГРАФУ ПИФАГОРА**

В работе предлагается применить для моделирования плоской сетки изотропную кривую по годографу Пифагора (PH). Построение сетки осуществляется на основе конформной и квазиконформной замены параметра. Доказано, что при конформной замене параметра сетка будет ортогональная и изотермическая. Рассчитаны коэффициенты первой квадратичной формы. Для расчетов используется кривая, которая задана в комплексном пространстве.

Ключевые слова: изотропная кривая, кривая по годографу Пифагора, плоская сетка, ортогональная сетка.

N. N. Ausheva**MODELING OF PLANAR GRIDS BASED ON ISOTROPIC CURVES BY PYTHAGOREAN HODOGRAPH**

The paper proposed to use an isotropic curve by Pythagorean hodograph (PH) for modeling a planar grid. Construction of grid is performed based on conformal and quasi-conformal replacement of parameters. It is proved that the grid is orthogonal and isothermal due to conformal replacement of parameter. Coefficients of the first quadratic form were calculated. For calculations it is used the curve, which is given in the complex space.

Keywords: isotropic curve, curve by Pythagorean hodograph, planar grid, orthogonal grid

Постановка проблеми. При моделюванні поверхонь часто виникають питання одержання поверхонь із сітками, що мають специфічні властивості. Такими властивостями можуть бути ортогональність та ізотермічність. При використанні кривих з конкретно заданою довжиною доцільно переходити до натурального параметра, що не завжди буває можливо. При роботі з поліноміальними кривими доводиться застосовувати апроксимаційні методи для розрахунку довжини кривої. Розгляд у комплексі цих питань призводить до доцільності дослідження побудови сіток на основі кривих, які дозволяють розраховувати довжину кривої без додаткових обчислень. Постійне доповнення апарату формоутворення таких сіток, призводить до полегшення розв'язання прикладних задач, які спираються на диференціальні властивості поверхонь.

Аналіз останніх досліджень. Конструюванню і перетворенню поверхонь із збереженням ортогональності сіток координатних ліній та ліній кривини присвячено дисертацію [1]. Розглянуто утворення плоских ортогональних сіток різними способами, перетворення їх у поверхні та подальше конформне перетворення одержаних поверхонь із збереженням вказаних властивостей. Авторами роботи [2] запропоновано новий метод побудови плоских ортогональних та ізотермічних координатних сіток на основі ізотропних кривих Без'є 3-го порядку. Отримано умови утворення таких сіток із застосуванням конформного та квазіконформного відображення. Наведено приклад використання існуючого способу одержання просторової ортогональної сітки на основі плоскої.

Професором Ріда Фароуки та його соавторами [3-6] досліджується застосування кривих за годографом Піфагора (PH) у геометричному дизайні, графіці, плануванні та керуванні рухом. Розглядається теорія, алгоритми та використання плоских та просторових PH-кривих. Автором роботи [7] пропонується моделювати плоску ізотропну криву за годографом Піфагора (PH). Знайдені залежності для кривої Без'є 3-го порядку за годографом Піфагора та побудовано ізотропну криву.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даної роботи є розробка способу конструювання плоских сіток на основі конформної та квазіконформної заміни параметра. Використання кривих за годографом Піфагора дозволить зробити метод генерації сітки залежним від дійсної довжини напрямної кривої.

Основна частина. Існує деякий клас кривих який називається кривими за годографами Піфагора [6]. З математичної точки зору плоска крива $r(t) = [x(t) \ y(t)]$ буде кривою за годографом Піфагора (РН) тоді і тільки тоді, коли годограф (похідні) від $r(t)$ пов'язані наступним співвідношенням:

$$|r'(t)|^2 = x'(t)^2 + y'(t)^2 = \sigma(t)^2, \quad (1)$$

для деякого многочлена $\sigma(t)$.

Для виразу (1) були знайдені умови, за якими поліноміальна крива може бути РН-кривою:

$$x'(t) = w(t)(u(t)^2 - v(t)^2), \quad y'(t) = 2w(t)u(t)v(t), \quad (2)$$

де $u(t)$, $v(t)$, $w(t)$ - поліноми.

Побудуємо плоску сітку на основі ізотропної кривої за годографом Піфагора, якщо крива подається у вигляді кубічної кривої Без'є:

$$r(t) = \sum_{i=0}^n r_j J_{n,j}(t), \quad \text{де } J_{n,j}(t) = \frac{n!}{i!(n-j)!} t^j (1-t)^{n-j}, \quad r_j = [x_j \ y_j], \quad n=3. \quad (3)$$

Для кубічної кривої задамо $w(t) = 1$, а залежності $u(t)$ та $v(t)$ задаються у вигляді лінійних поліномів:

$$u(t) = u_a(1-t) + u_b t, \quad v(t) = v_c(1-t) + v_d t, \quad (4)$$

де u_a, u_b, v_c, v_d - комплексні числа.

У роботі [7] було знайдено залежності для кубічної кривої Без'є за годографом Піфагора:

$$x_0 = \frac{v_c^2}{3}, \quad x_1 = \frac{u_a^2}{3}, \quad x_2 = \frac{u_a^4}{3v_c^2}, \quad x_3 = \frac{u_a^6}{3v_c^4}, \quad y_1 = \frac{2}{3}u_a v_c + y_0, \quad y_2 = \frac{2u_a^3}{3v_c} + y_1, \quad (5)$$

$$y_3 = \frac{2u_a^5}{3v_c^3} + y_2.$$

Для ізотропної кривої необхідно накласти додаткову умову:

$$v_c^2 = -u_a^2 \quad \text{або} \quad v_c^2 = u_a^2 \frac{-1 \pm \sqrt{3}i}{2} \quad (6)$$

Підставимо в рівняння (3) $t = u + iv$, співвідношення (5) з умовою (6), будемо мати:

$$x(u + iv) = (-0.17 + 0.29i)u_a^2(1-u-iv)^3 + u_a^2(1-u-iv)^2(u+iv) + (-0.5 - 0.87i)u_a^2(1-u-iv)(u+iv)^2 + (-0.17 + 0.29i)u_a^2(u+iv)^3,$$

$$y(u + iv) = y_0(1-u-iv)^3 + 3((0.34 + 0.58i)u_a^2 + y_0)(1-u-iv)^2(u+iv) + 3(0.67u_a^2 + y_0)(1-u-iv)(u+iv)^2 + y_0(u+iv)^3. \quad (7)$$

Відокремимо дійсну частину від одержаних виразів (7) та проведемо дослідження. Для цього візьмемо часткові похідні:

$$x_u(u, v) = x_{u0}(u, v) + x_{u1}(u, v)u + x_{u2}(u, v)u^2, \quad \text{де}$$

$$x_{u0}(u, v) = (5u_{a\text{Im}}^2 - 5u_{a\text{Re}}^2 + 5.2u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}})v^2 + 12u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}}v + 1.73u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}} + 1.5u_{a\text{Re}}^2 - 1.5u_{a\text{Im}}^2,$$

$$x_{u1}(u, v) = (5.2u_{a\text{Im}}^2 - 5.2u_{a\text{Re}}^2 - 18u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}})v - 6u_{a\text{Re}}^2 + 6u_{a\text{Im}}^2,$$

$$x_{u2}(u, v) = -4.5u_{a\text{Im}}^2 + 4.5u_{a\text{Re}}^2 - 5.2u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}};$$

$$x_v(u, v) = x_{v0}(u, v) + x_{v1}(u, v)u + x_{v2}(u, v)u^2, \quad \text{де}$$

$$x_{v0}(u, v) = (-2.6u_{a\text{Im}}^2 + 2.6u_{a\text{Re}}^2 + 9u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}})v^2 + (6u_{a\text{Re}}^2 - 6u_{a\text{Im}}^2)v - 3u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}} + 0.9u_{a\text{Re}}^2 - 0.9u_{a\text{Im}}^2,$$

$$x_{v1}(u, v) = (9u_{a\text{Im}}^2 - 9u_{a\text{Re}}^2 + 10.4u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}})v + 12u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}},$$

$$x_{v2}(u, v) = 2.6u_{a\text{Im}}^2 - 2.6u_{a\text{Re}}^2 - 9u_{a\text{Re}}u_{a\text{Im}};$$

$$y_u(u, v) = y_{u0}(u, v) + y_{u1}(u, v)u + y_{u2}(u, v)u^2, \text{ де}$$

$$y_{u0}(u, v) = (-3u_{aIm}^2 + 3u_{aRe}^2 + 10.4u_{aRe}u_{aIm})v^2 + (6.9u_{aRe}^2 - 6.9u_{aIm}^2)v - 3.5u_{aRe}u_{aIm} + u_{aRe}^2 - u_{aIm}^2,$$

$$y_{u1}(u, v) = (10.4u_{aIm}^2 - 10.4u_{aRe}^2 + 12u_{aRe}u_{aIm})v + 12u_{aRe}u_{aIm},$$

$$y_{u2}(u, v) = 3u_{aIm}^2 - 3u_{aRe}^2 - 10.4u_{aRe}u_{aIm};$$

$$y_v(u, v) = y_{v0}(u, v) + y_{v1}(u, v)u + y_{v2}(u, v)u^2, \text{ де}$$

$$y_{v0}(u, v) = (-5.2u_{aIm}^2 + 5.2u_{aRe}^2 - 6u_{aRe}u_{aIm})v^2 - 13.9u_{aRe}u_{aIm}v - 2u_{aRe}u_{aIm} - 1.73u_{aRe}^2 + 1.73u_{aIm}^2$$

$$y_{v1}(u, v) = (-6u_{aIm}^2 + 6u_{aRe}^2 + 20.78u_{aRe}u_{aIm})v + 6.9u_{aRe}^2 - 6.9u_{aIm}^2,$$

$$y_{v2}(u, v) = (5.2u_{aIm}^2 - 5.2u_{aRe}^2 + 6u_{aRe}u_{aIm}).$$

Проведений аналіз показав, що $x_v(u, v) \neq y_u(u, v)$, $x_u(u, v) \neq -y_v(u, v)$.

При підстановці у вирази для першої квадратичної форми одержимо: $F \neq 0$, $E \neq G$, тобто сітка не буде ортогональною та ізотермічною.

Для виконання умов ортогональності та ізотермічності необхідно, щоб виконувались умови :

$$x_v(u, v) = y_u(u, v), \quad x_u(u, v) = -y_v(u, v) \quad (8)$$

Розглянемо детальніше вирази часткових похідних. При аналізі видно, що відмінність часткових похідних для координати x від часткових похідних для координати y складає певну константу. Для знаходження цієї константи візьмемо результат ділення : $\frac{x_v(u, v)}{y_u(u, v)}$, одержимо

$$const = 1.154700577. \quad \text{Аналогічно порівняємо } x_u(u, v) \text{ та } y_v(u, v), \text{ одержимо:}$$

$$\frac{x_u(u, v)}{y_v(u, v)} = -const = -1.154700577.$$

Розглянемо узагальнений підхід до формування базисних функцій (4). Для виконання умови (8) необхідно накласти наступні обмеження:

$$v_{cRe} = -u_{aIm}, \quad v_{cIm} = u_{aRe}, \quad v_{dIm} = u_{bRe}, \quad v_{dRe} = -u_{bIm}. \quad (9)$$

Вирази (9) визначають умови ортогональності та ізотермічності сітки, побудованої на основі РН-кривої для лінійних базових функцій.

Координати кривої Без'є визначаються на основі виразів:

$$x_1 = \frac{u_a^2 - v_c^2}{3} + x_0, \quad x_2 = \frac{u_a u_b - v_c v_d}{3} + x_1, \quad x_3 = \frac{u_b^2 - v_d^2}{3} + x_2, \quad (10)$$

$$y_1 = \frac{2u_a v_c}{3} + y_0, \quad y_2 = \frac{u_a v_d - v_c u_b}{3} + y_1, \quad y_3 = \frac{2u_b v_d}{3} + y_2.$$

Якщо узагальнити даний підхід, то отримуємо наступне твердження: для моделювання ортогональної та ізотермічної сітки, побудованої на основі плоскої РН-кривої, необхідно, щоб виконувалась умова:

$$v(t) = iu(t). \quad (11)$$

Дослідимо сітку, побудовану на основі квазіконформного відображення $t = ku + iv$ та ізотропної кубічної кривої Без'є за годографом Піфагора. При дослідженні часткових похідних, прийдемо до рівнянь (12):

$$kx_v(u, v) = y_u(u, v), \quad x_u(u, v) = -ky_v(u, v) \quad (12)$$

Тепер розрахуємо коефіцієнти першої квадратичної форми:

$$F = -ky_v(u, v)x_v(u, v) + kx_v(u, v)y_v(u, v) = 0, \quad E = k^2(x_v(u, v)^2 + y_v(u, v)^2),$$

$$G = x_v(u, v)^2 + y_v(u, v)^2, \text{ тобто } E = k^2G.$$

Сітка буде ортогональна, але не ізотермічна.

Проведемо дослідження сітки, яка побудована за допомогою відображення $t = u + ivk$, одержимо:

$$x_v(u, v) = ky_u(u, v), \quad kx_u(u, v) = -y_v(u, v) \quad (13)$$

Розрахуємо коефіцієнти для першої квадратичної форми:

$$F = x_u(u, v)ky_u(u, v) - y_u(u, v)kx_u(u, v) = 0,$$

$$E = x_u(u, v)^2 + y_u(u, v)^2, \quad G = k^2(y_u(u, v)^2 + x_u(u, v)^2), \text{ тобто } k^2 E = G.$$

Сітка буде ортогональна, але не ізотермічна.

Приклад. Побудуємо сітку на основі кривих за годографом Піфагора.

Задамо : $u(t) = (4 - 5i)(1 - t) + (5 - 3i)t$, $x_0 = 2 + 3i$, $y_0 = 3 + 4i$. На основі виразу (11) розрахуємо $v(t)$: $v(t) = (5 + 4i)(1 - t) + (3 + 5i)t$.

Застосовуючи вирази (10), знайдемо інші координати реперних точок:

$$x_1 = -4 - 23.67i, \quad x_2 = -0.67 - 48.33i, \quad x_3 = 10 - 68.33i,$$

$$y_1 = 29.67 - 2i, \quad y_2 = 54.33 + 1.33i, \quad y_3 = 74.33 + 12i.$$

На рис.1 відображено побудовані дійсні сітки на основі кривої Без'є за годографом Піфагора.

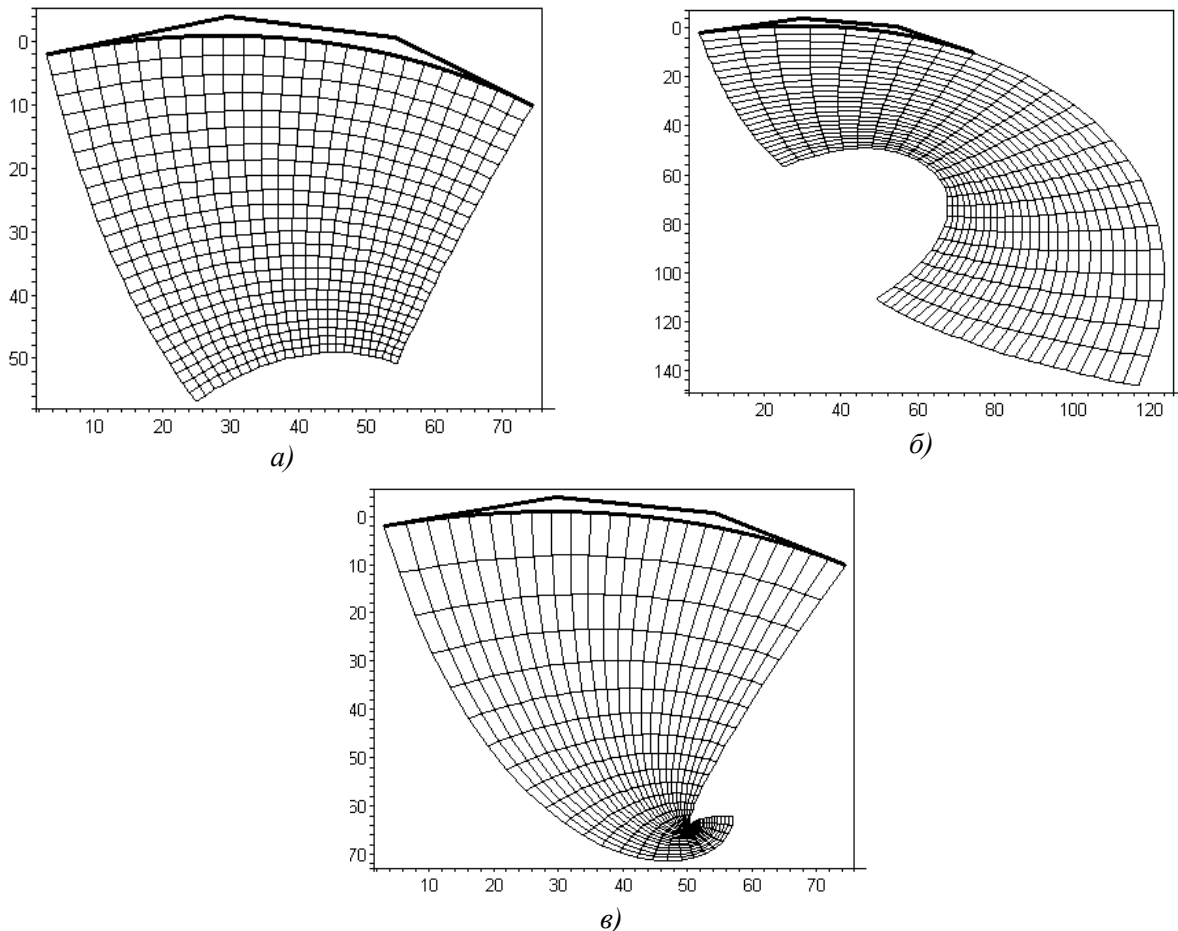


Рис. 1. Дійсні сітки на основі кривої Без'є за годографом Піфагора при різній заміні параметра (а - $t = u + iv$, б - $t = 3u + iv$, в - $t = u + 3iv$)

Рівняння для дійсної сітки на основі кривої за годографом Піфагора:

а) при заміні $t = u + iv$ (рис. 1а):

$$x(u, v) = 2 - 18u + 79.99v - 28v^2 + 28u^2 - 12uv + 5.99uv^2 - 1.99u^3 + 2.66v^3 - 8u^2v,$$

$$y(u, v) = 3 - 80u + 18v + 6v^2 - 6u^2 - 55.99uv + 7.99uv^2 - 2.66u^3 - 1.99v^3 + 5.99u^2v;$$

б) при заміні $t = 3u + iv$ (рис. 1б):

$$x(u, v) = 2 - 54u + 79.99v - 28v^2 + 252u^2 - 35.99uv + 17.99uv^2 - 53.99u^3 + 2.66v^3 - 72u^2v,$$

$$y(u, v) = 3 - 240u + 18v + 6v^2 - 54u^2 - 168uv + 23.99uv^2 - 71.99u^3 - 1.99v^3 + 53.99u^2v;$$

в) при заміні $t = u + 3iv$ (рис. 1в):

$$x(u, v) = 2 - 18u + 239.99v - 252v^2 + 28u^2 - 35.99uv + 53.99uv^2 - 1.99u^3 + 72v^3 - 24u^2v,$$

$$y(u, v) = 3 + 80u + 54v + 54v^2 - 6u^2 - 168uv + 71.99uv^2 - 2.66u^3 - 53.99v^3 + 17.99u^2v.$$

Висновки. Дослідження показали, що застосування конформного та квазіконформного відображення до ізотропної кривої Без'є за годографом Піфагора породжує сітки на площині з властивістю ортогональності, що відкриває нові можливості щодо конструювання поверхонь на основі заданої довжини напрямної кривої.

1. Дзюба В.В. Конструювання і перетворення поверхонь із збереженням ліній кривини: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.01 „Прикладна геометрія, інженерна графіка” / В.В. Дзюба. - К.: КНУБА, 2008. - 21 с.
2. Аушева Н. М. Побудова поверхонь з ортогональними координатними сітками на основі ізотропних кривих / Н.М. Аушева, А.А. Демчишин // Прикладна геометрія та інженерна графіка : міжв. наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2013. – Вип. 91. – С. 2–7.
3. Farouki R.T. Algorithms for spatial Pythagorean–hodograph curves / R.T. Farouki, C.Y. Han // Geometric Properties for Incomplete Data. – Springer, 2006. – P.43–58.
4. Farouki R.T. Construction of Bezier surface patches with Bezier curves as geodesic boundaries / R.T. Farouki, N. Szafran, L. Biard // Preprint submitted to Elsevier. – 2009. – 28 P.
5. Farouki R.T. Pythagorean hodographs / R.T. Farouki, T. Sakkalis // IBM J. Res. Develop. – № 34(5). – 1990. – P.736–752.
6. Farouki R.T. Pythagorean–Hodograph Curves: Algebra and Geometry Inseparable / R.T. Farouki. – Springer, 2008. – 728 p.
7. Аушева Н. М. Конструювання плоскої ізотропної кривої на основі рівняння кривої за годографом Піфагора / Н.М. Аушева // Технічна естетика і дизайн : міжв. наук.-техн. зб. – К. : КНУБА, 2013. – Вип. 12.– С. 7–11.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2015.

УДК 514.18

В.М. Бабка

ЗМІНА НАПРЯМУ ОБЕРТАННЯ ВІДРІЗКА БЕЗ ЙОГО ЗУПИНКИ

В роботі розглянуто рух відрізка за умови, що швидкості його кінців рівні. Знайдено умови, за яких траєкторії кінців відрізка переходять з одного кола на інше. При цьому змінюється напрям обертання відрізка. Чисельним інтегруванням побудовано траєкторії руху кінців відрізка.

Ключові слова: швидкість, траєкторія, натуральне рівняння, тригранник Френе.

Бабка В.Н.

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ОТРЕЗКА БЕЗ ЕГО ОСТАНОВКИ.

Рассмотрено движение отрезка с условием, что скорости его концов равны. Найдены условия, при которых траектории концов отрезка переходят с одной окружности на другую. При этом изменяется направление вращения отрезка. Численным интегрированием построены траектории движения концов отрезка.

Ключевые слова: скорость, траектория, натуральное уравнение, трехгранник Френе.

Babka V.

VEERING OF TWIRL OF A SEGMENT WITHOUT ITS STOP.

Conditions at which trajectories of the ends of a segment pass from one round to another are discovered. The segment rotation sense thus varies. Driving of a segment with a condition, that velocities of its extremities the equal is observed. The numerical integration are constructed mechanical trajectories of the extremities of a segment.

Key words: velocity, trajectory, natural equation, three – edge of Frenet.

Постановка проблеми. Застосування супровідного тригранника кривої, як рухомої системи по відношенню до нерухомої дозволяє знаходити криві за наперед заданими властивостями. Наприклад, у праці [1] знайдено криву, яка за своїми кінематичними характеристиками є аналогом прямої, а саме: при однакових коефіцієнтах тертя матеріальна точка буде рухатися по них під дією сили власної ваги із однаковими сталими швидкостями (мається на увазі, що крива є ортогональним перерізом циліндра вертикальною площиною, а пряма – аналогічним перерізом похилої площини). У праці [2] досліджується такий відносний рух відрізка у системі тригранника, при якому його кінці у абсолютному русі мають однакові швидкості, причому траєкторія одного кінця задана.

Аналіз останніх досліджень. Використання тригранника Френе, який є супровідним для розшукуваної кривої із заданими властивостями, показано в згаданій праці [1]. В працях [2, 3] розглянуто рух відрізка із сталими швидкостями переміщення його кінців для заданих траєкторій руху одного кінця. Показано, зокрема, що при заданій траєкторії руху одного кінця задача має два розв'язки, одним із яких є поступальне переміщення відрізка по конгруентних кривих. Останні публікації робіт із прикладної геометрії показують, що цей напрям становить певний інтерес для досліджень кривих та їх властивостей.

Формулювання мети статті. Знайти такий рух відрізка у площині з рівними швидкостями кінців, при якому зміна його напрямку обертання навколо середини не приводить до зупинки самого відрізка.

Основна частина. Розглянемо супровідний тригранник Френе в точці A плоскої кривої. В системі самого тригранника задамо точку B , радіус-вектор якої позначимо через відстань ρ (рис. 1,а). Його проекції на орти $\bar{\tau}$ і \bar{n} тригранника запишуться довжини дуги s кривої:

$$\rho_{\tau} = \rho_{\tau}(s); \quad \rho_n = \rho_n(s). \quad (1)$$

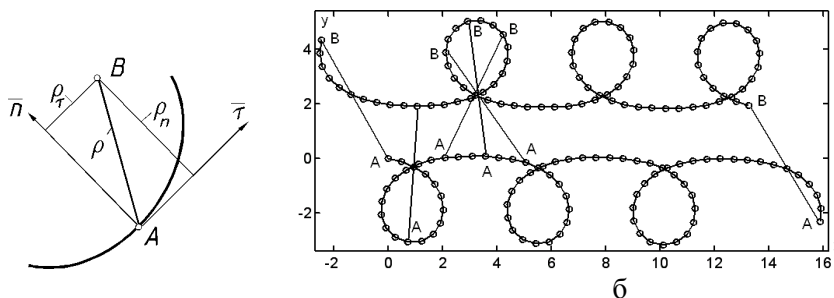


Рисунок 1. До знаходження абсолютної траєкторії точки B :

- а) положення точки B в системі тригранника Френе (бінормаль \bar{b} проєкціюється в точку);
 б) траєкторії кінців відрізка AB знайдені на основі функцій $\rho_\tau = \rho \cos as$ і $\rho_n = \rho \sin as$.

Якщо відстань $\rho=AB$ є величиною сталою, то в системі тригранника можна розглядати відносний рух відрізка AB , причому траєкторією точки A буде задана напрямна крива, а траєкторію точки B необхідно розшукати при умові рівності швидкостей кінців відрізка. У праці [4] отримано вирази для знаходження абсолютної швидкості точки B в проєкціях на орти тригранника, із яких можна отримати аналітичну умову рівності швидкостей кінців відрізка через рівняння (1) та їх похідні і натуральне рівняння $k=k(s)$ кривої, по якій рухається точка A . Ця умова має наступний вигляд:

$$(\rho'_\tau - k\rho_n + 1)^2 + (k\rho_\tau + \rho'_n)^2 = 1. \quad (2)$$

Після піднесення до квадрату і спрощень рівність (2) набуває вигляду:

$$2(\rho'_\tau - k\rho_n) + \rho'^2_\tau + \rho'^2_n + k^2(\rho^2_\tau + \rho^2_n) + 2k(\rho_\tau\rho'_n - \rho'_\tau\rho_n) = 0. \quad (3)$$

Оскільки довжина відрізка незмінна, то до рівняння (3) потрібно додати ще одне: $\rho^2_\tau + \rho^2_n = \rho^2 = const$. Для того, щоб отримати закономірність руху відрізка за рівнянням (3), необхідно задати якусь умову, наприклад, натуральне рівняння вихідної кривої $k=k(s)$. Можна також задати одну із закономірностей $\rho_\tau = \rho_\tau(s)$ або $\rho_n = \rho_n(s)$ і знайти натуральне рівняння вихідної кривої. В роботі [3] розглянуті закономірності на базі тригонометричних функцій $\rho_\tau = \rho \cos as$ і $\rho_n = \rho \sin as$ і отримані відповідні траєкторії руху точок A і B (рис. 1,б). В даній праці ми розглянемо аналогічні залежності на базі гіперболічних функцій:

$$\rho_\tau = \rho / \cosh as; \quad \rho_n = \rho \tanh as, \quad (4)$$

які відповідають умові $\rho^2_\tau + \rho^2_n = \rho^2$, причому ρ і a – сталі величини. Знайдемо похідні виразів (4):

$$\rho'_\tau = -\frac{a\rho \tanh as}{\cosh as}; \quad \rho'_n = \frac{a\rho}{\cosh^2 as}. \quad (5)$$

Підставимо (4) і (5) в (3) і після спрощень отримаємо:

$$\rho \left(k + \frac{a}{\cosh as} \right) \left(k\rho + \frac{a\rho}{\cosh as} - 2 \tanh as \right) = 0. \quad (6)$$

Розв'язавши (6) відносно k , будемо мати два розв'язки:

$$k = -\frac{a}{\cosh as}; \quad k = \frac{1}{\rho \cosh as} (2 \sinh as - a\rho). \quad (7)$$

До першого розв'язку не входить довжина ланки ρ . Перехід від натурального до параметричних рівнянь кривої (траєкторії точки A) здійснимо за відомими формулами:

$$x_A = \int \cos \left(\int k ds \right) ds; \quad y_A = \int \sin \left(\int k ds \right) ds. \quad (8)$$

Після підстановки (7) в (8) і інтегрування одержимо:

$$x_A = \frac{1}{a} \arccos \left(\frac{1}{\cosh as} \right); \quad y_A = -\frac{1}{a} \ln \left(\frac{1}{\cosh as} \right). \quad (9)$$

Знайдемо траєкторію точки B за формулами, наведеними в праці [4]:

$$\begin{aligned} x_B &= \rho_\tau \cos \left(\int k ds \right) - \rho_n \sin \left(\int k ds \right) + x_A; \\ y_B &= \rho_\tau \sin \left(\int k ds \right) + \rho_n \cos \left(\int k ds \right) + y_A. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставивши в (10) вирази (9) і перший вираз із (7), після інтегрування і спрощень одержимо:

$$x_B = \frac{1}{a} \arccos \left(\frac{1}{\cosh as} \right) + \rho; \quad y_B = -\frac{1}{a} \ln \left(\frac{1}{\cosh as} \right). \quad (11)$$

Порівнюючи траєкторію точки A (9) і траєкторію точки B (11), бачимо, що вони конгруентні і зміщені вздовж осі Ox на величину довжини відрізка ρ . Отже відрізок здійснює

поступальний рух (рис. 2,а). Звідси стає зрозуміло, чому до натурального рівняння траєкторії точки A (перший вираз в 7) не входить довжина відрізка ρ . Відрізок буде рухатися поступально з рівними швидкостями кінців при будь-якій довжині відрізка ρ .

Стосовно другого варіанту руху, для якого траєкторія точки A описується другим рівнянням в (7), то перехід від натурального рівняння до параметричних за формулами (8) неможливий в аналітичному вигляді, отже потрібно застосовувати чисельне інтегрування. На рис. 2,б показано фрагменти траєкторій з відрізком $AB=\rho=1$ в крайніх положеннях, одержаних при $a=0,5$.

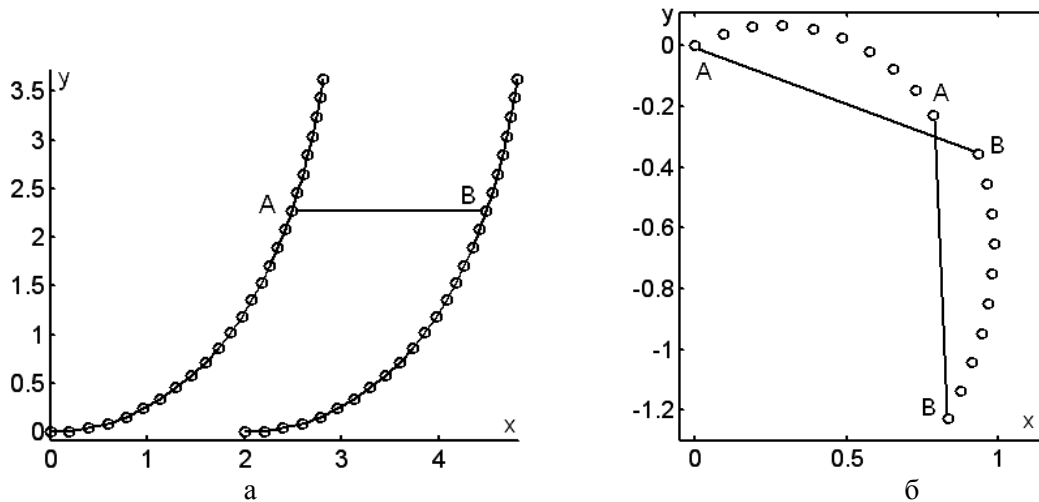


Рисунок 2. Траєкторії відрізка сталої довжини AB , у яких одна крива задається одним із натуральних рівнянь (7):

- а) траєкторія точки A задається першим рівнянням (7);
 б) траєкторія точки A задається другим рівнянням (7).

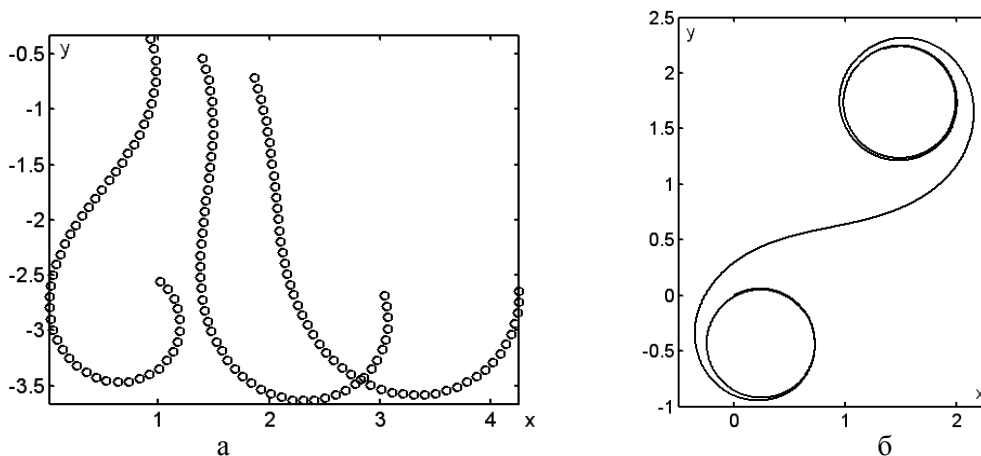


Рисунок 3. Крива, побудована чисельними методами за натуральним рівнянням

$$k = (2 \sinh as - a\rho) / (\rho \cosh as):$$

- а) дуги однакої довжини при $a=0,5$ і $\rho=1,0$; $\rho=1,5$; $\rho=2,0$;
 б) крива при зміні s від $-\infty$ до $+\infty$ ($a=0,5$; $\rho=1$).

З'ясуємо форму напрямної кривої. До її натурального рівняння входять дві сталі величини: a і ρ . Вивчимо їх вплив на форму кривої. На рис. 3,а побудовані дуги рівної довжини кривої при зміні натурального параметра в однакових межах з однаковим значенням сталої a і різними значеннями сталої ρ . На рис. 3,б зображена крива при зміні натурального параметра від мінус нескінченності до плюс нескінченності. Вона подібна до кловоїди. При необмеженому зростанні натурального параметра вона наближається до кола, яке є для неї асимптотичним. Щоб взнати його радіус, проаналізуємо натуральне рівняння кривої $k = (2 \sinh as - a\rho) / (\rho \cosh as)$. При необмеженому зростанні параметра s перша складова $2 \tanh as / \rho$ дуже швидко наближається до

значення $2/\rho$ (оскільки тангенс гіперболічний наближається до одиниці), а друга складова $-a/\cosh as$ - до нуля. Таким чином, діаметр асимптотичного кола дорівнює довжині відрізка ρ .

На рис. 4 за допомогою чисельних методів побудовано траєкторії точок A і B із зображенням проміжних положень відрізка AB при його русі по кривих. Внаслідок того, що крок інтегрування вибрано досить великий (він дорівнює відстані між сусідніми точками на кривих), самі криві побудовані не дуже точно. Проте на цьому рисунку зручно простежити рух відрізка із одного кола на друге.

Оскільки діаметр кола дорівнює довжині відрізка $AB=\rho$, то при досить великих значеннях параметра s його кінці будуть рухатися із однаковими швидкостями по колу, знаходячись в діаметрально протилежних точках, тобто відрізок AB буде проходити через центр кола.

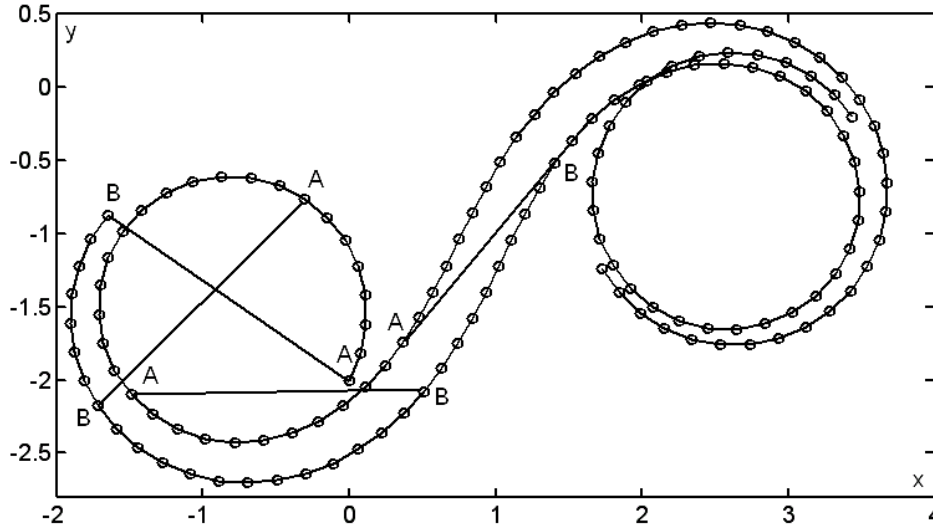


Рисунок 4. Рух відрізка AB з рівними швидкостями його кінців по кривих, які забезпечують перехід його із одного кола на інше.

При послідовному русі відрізка з лівого кола на праве (рис. 4) кутова швидкість змінює свій напрям на протилежний (проти годинникової стрілки на лівому колі і за годинниковою стрілкою на правому колі).

З'ясуємо, як впливає на траєкторію точки A (вихідну криву) величина сталої a . На рис. 5,а побудовано криву при тому ж значенні $\rho=2$, що і на рис. 4, а величину сталої a збільшили від 0,5 до 2. Із рисунка видно, що міжцентрова відстань зменшилася. Таким чином, з'ясовано вплив величини сталої a і ρ на форму і параметри вихідної кривої $k = (2 \sinh as - a\rho)/(\rho \cosh as)$.

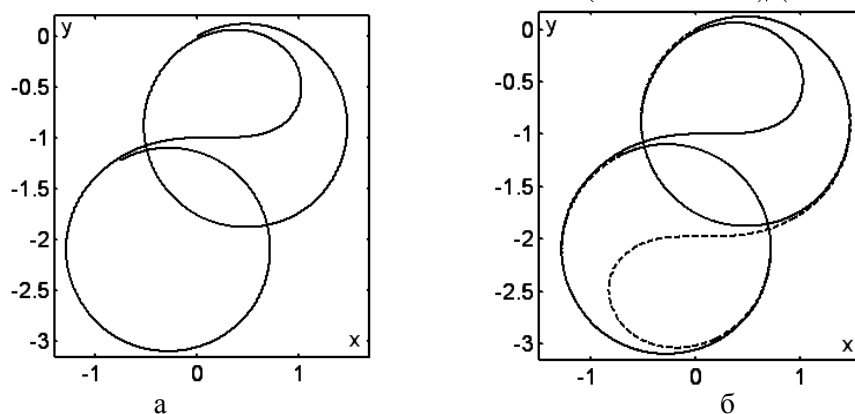


Рисунок 5. Криві, що забезпечують рух відрізка з одного кола на інше ($\rho=2$; $a=2$):
а) траєкторія руху точки A ;
б) траєкторії руху двох точок (штриховою лінією показана траєкторія руху точки B).

Зменшимо міжцентрову відстань між колами вихідної кривої, збільшивши величину сталої a . На рис 6 побудовані траєкторії руху точок A і B при різних значеннях сталої a . На рис. 6,а показані положення відрізка AB на початку переходу на друге коло, в середині переходу і в кінці переходу. При такому переході з'ясовано цікаві властивості руху відрізка. По-перше, прослідкувавши за рухом точки A (або B), можна побачити, що відрізок міняє напрям

обертального руху (про що вже говорилося), а по-друге, середина відрізка в процесі такого переходу рухається по прямій лінії з точки O до O' . Отже можна поміняти напрям обертального руху відрізка на протилежний без його зупинки, перемістивши центр обертання по прямій лінії із одного положення в друге, при цьому кінці відрізка повинні рухатися по спеціальних траєкторіях.

Таким чином, збільшення сталої a веде до зменшення міжцентрової відстані OO' і також до зменшення величини петлі, яку описують кінці відрізка при зміні напрямку кутової швидкості обертання на протилежний. Можна припустити, що нескінченному зростанні величини a обидва кола збігаються, а петля перетвориться в точку звороту. В цьому випадку зміна напрямку обертання відрізка відбувається в момент його зупинки. Зменшення сталої a веде до збільшення петлі і більш плавної зміни напрямку обертання відрізка навколо його середини без зупинки.

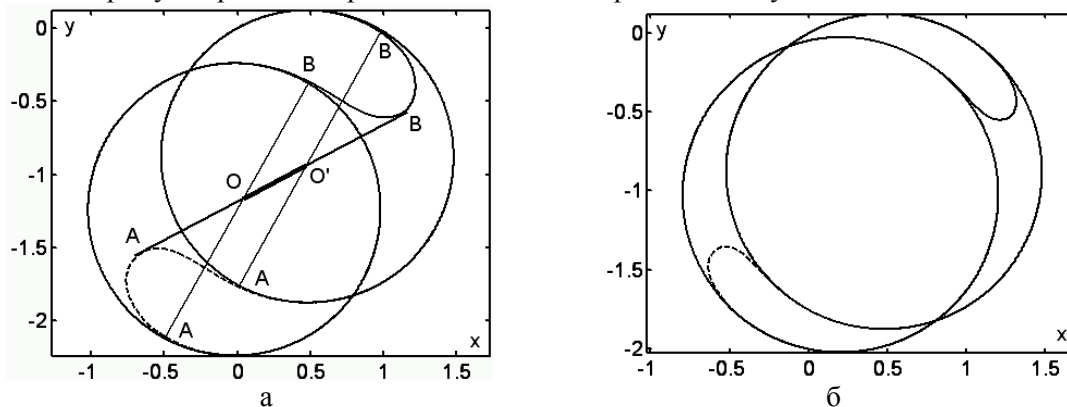


Рис. 6. Траєкторії точок A і B , побудовані при $\rho=2$ і різних значеннях сталої a :
а) $a=5$; б) $a=10$.

Висновки. На основі залежностей $\rho_\tau = \rho / \cosh as$; $\rho_n = \rho \tanh as$, які задають проекції руху точки A в системі тригранника Френе на його орти знайдені траєкторії кінців відрізка AB при умові рівності швидкостей його кінців. Ці траєкторії дозволяють поміняти напрям обертального руху відрізка на протилежний без його зупинки, перемістивши центр обертання по прямій лінії із одного положення в друге, при цьому кінці відрізка повинні рухатися по спеціальних траєкторіях у вигляді петель. До і після здійснення зміни напрямку обертання відрізок обертається навколо своєї середини, а його кінці рухаються по колах. Під час зміни напрямку обертання кінці відрізка рухаються по петлях, форма яких визначається чисельним інтегрування складених диференціальних рівнянь.

1. Пилипака С. Ф. Параметричні та натуральні рівняння кривих із заданими кінематичними характеристиками / С. Ф. Пилипака, В. М. Несвідомін, Т. С. Пилипака // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (44). – Дніпропетровськ, 2006. – С. 69–75.
2. Пилипака С.Ф. Кінематика відрізка, кінці якого описують задані лінії у площині / С.Ф. Пилипака, В.М. Бабка, Т.С. Пилипака // Прикл. геометрія та інж. графіка. – К.: КНУБА, 2007. – Вип. 77. – С. 36–42.
3. Бабка В. М. Рух відрізка у площині із рівними швидкостями його кінців / В. М. Бабка, Т. С. Пилипака // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань "Машино-будування та металообробка", "Інженерна механіка", "Металургія та матеріалознавство". – Вип. 29.–Луцьк: ЛНТУ, 2010. – С. 4 – 8.
4. Пилипака С. Ф. Теорія складного руху матеріальної точки на площині. Частина перша. Абсолютна швидкість і траєкторія / С. Ф. Пилипака // Електротехніка і механіка. – К., 2006. - № 1. – С. 84 -94.

Стаття надійшла в редакцію .

УДК514.8

О.Г. Бідніченко*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв)***ГЕОМЕТРИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН
ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРІВ**

В даній роботі наведені конструктивні особливості проточної частини відцентрових компресорів та надано деякі методи геометричного моделювання їх елементів .

Ключові слова: відцентровий компресор, робоче колесо, геометричне моделювання, проточна частина

Форм. 1. Рис. 5. Літ. 3

Е.Г. Бидниченко**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ
ЧАСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

В данной работе приведены конструктивные особенности проточной части центробежных компрессоров и показаны некоторые методы геометрического моделирования их элементов.

Ключевые слова: центробежный компрессор, рабочее колесо, геометрическое моделирование, проточная часть

Н. Bidnichenko**GEOMETRIC DESIGN FEATURES of flowing parts of CENTRIFUGAL COMPRESSORS**

The paper presents the design features of flow parts of centrifugal compressors and shows some methods of geometric modeling of their elements

Keywords: centrifugal compressor, impeller, geometric modeling, flow parts

Постановка проблеми: Для реалізації задачі підвищення ефективності відцентрових компресорів необхідні відповідні сучасні методи геометричного моделювання, які враховують особливості геометрії елементів проточних частин. Сучасні математичні методи дають можливість оказувати локальний вплив на форму кривої обводів, яка реагує навіть на незначну зміну будь-якого геометричного параметра проточної частини. Застосування комплексного підходу до геометричного моделювання рухомих і нерухомих елементів, лопаток соплових апаратів, пристроїв підведення робочої речовини дозволяє поліпшити геометричні характеристики обводів і поверхонь, які формують течію робочої речовини в проточній частині, тобто впливають на ефективні показники відцентрового компресора.

Важливим резервом для вирішення задачі аеродинамічного вдосконалення елементів проточних частин компресорів на сучасному етапі є вдосконалення методів формування поверхонь їх проточних частин створенням надійних гнучких методів теоретичного визначення показників ефективності роботи машин, а також геометричних моделей, що їх реалізують.

Мета статті. Метою статті є аналіз геометричних особливостей елементів проточних частин відцентрових компресорів, огляд методів, алгоритмі і програм геометричного моделювання робочого колеса відцентрових компресорів (меридіональних обводів проточної частини та профілю лопаток на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса колеса), а також оцінка якості змодельованих каналів робочих коліс відцентрових компресорів виходячи з аналізу форми отриманих меридіональних обводів, розрахунків площ прохідних перетинів та циліндричних перерізів колеса різних радіусів.

Виклад основного матеріалу. Підвищення перепадів тисків, зростання продуктивності відцентрових компресорів зумовили підвищений рівень швидкостей потоку, що часом досягає звукових і надзвукових значень. Це призвело до різкого підвищення вимог, що пред'являються до геометрії елементів проточної частини компресорів.

Всі елементи проточної частини одно- та багатоступінчатих відцентрових компресорів можуть бути розділені на елементи статора і ротора. Елементом ротора є робоче колесо із закріпленими на

ньому лопатками. Статор включає корпус, вхідну систему, поворотне коліно, зворотний напрямний апарат і збірну відвідну камеру. Призначенням елементів статора є раціональна організація течії робочої речовини на вході в компресор, а також на виході з нього.

Вхідна система призначена для забезпечення рівномірного підведення потоку до робочого колеса і повинна створювати перед ним задану структуру потоку. Вона включає спрофільований прямолінійний або зігнутий патрубок, в якому можуть бути вмонтовані лопатки вхідного напрямного апарату і стійки. Вхідна система компресора може мати різні геометричні характеристики відповідно до її конструктивного оформлення. Осьова симетрія потоку перед колесом досягається застосуванням відповідного типу вхідної системи, а також ретельним профілюванням його каналу.

При профілюванні проточних частин відцентрових компресорів звичайно використовують порівняно прості математичні криві (дуги кіл, еліпсів, спіралі тощо), які вважалися задовільними. З появою нового технологічного обладнання, яке дозволяє виконувати високо якісні поверхні, виникла необхідність у вдосконаленні існуючих методик моделювання кривих обводів профілів. Перелічені геометричні особливості елементів проточних частин відцентрових компресорів вимагають розробки нових сучасних методів їх геометричного моделювання для підвищення ефективності та подовження терміну функціонування машин.

Робоче колесо є головним елементом, де відбувається підвищення тиску робочої речовини, та уявляє собою диск, з одного боку якого є канали, утворені спрофільованими і закріпленими на диску лопатками (рис. 1). Для забезпечення безвідривної течії міжлопаткові канали робочого колеса виконуються таким чином, що із збільшенням радіусу площі їх перерізів практично не змінюються. Це досягається зменшенням висоти каналів при віддаленні від осі обертання. З метою зменшення втрати на удар при вході потоку в робоче колесо вхідні кромки лопаток виконують загнутими вперед за ходом обертання ротора. За кут вигину береться кут між дотичною до середньої лінії лопатки на вході і напрямом обертання.

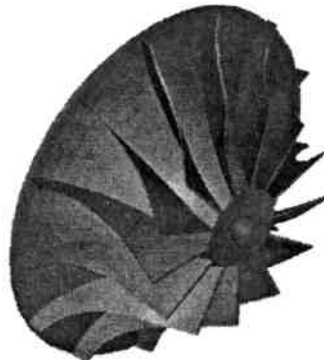


Рис. 1. Робоче колесо відцентрового компресора

Геометричне моделювання робочого колеса відцентрового компресора [1] складається із двох задач: профілювання меридіональних обводів та побудови профілю робочої лопатки на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса колеса.

Алгоритм моделювання меридіональних обводів втулки та периферії пропонується базувати на модифікованих кривих Безьє, у вершинах ламаних яких автором вводяться додаткові вагові коефіцієнти. Такий підхід дозволяє реалізувати локальність впливу на форму обводів меридіонального перерізу колеса.

У першому наближенні меридіональний обвід апроксимується кривою Безьє, яка визначається вершинами деякої ламаної лінії (рис. 2). Зміною положення вершин ламаної лінії впливають на форму кривої. З метою забезпечення додаткових можливостей локального впливу на форму результуючої кривої пропонується використовувати вагові коефіцієнти вершин ламаної. З урахуванням цього крива Безьє описується рівнянням

$$B(\bar{P}, t) = \sum_{k=0}^n \omega_k \cdot \bar{P}_k \cdot \Phi_{k,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

де ω_k – ваговий коефіцієнт k -ої вершини; \bar{P}_k – функція компонент векторів вершин ламаної; $\Phi_{k,n}$ – багаточлен Бернштейна; n – кількість вершин ламаної; t – параметр.

Багаточлен Бернштейна $\Phi_{k,n}$ визначається виразом:

$$\Phi_{k,n}(t) = \frac{n!}{k!(n-k)!} t^k (1-t)^{n-k}, k \in [0, n].$$

Плоска крива описується параметричними співвідношеннями:

$$x(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k x_k \Phi_{k,n}(t); \quad y(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k y_k \Phi_{k,n}(t),$$

де n – степінь апроксимуючого полінома, x_k, y_k – координати вершин характеристичної ламаної лінії.

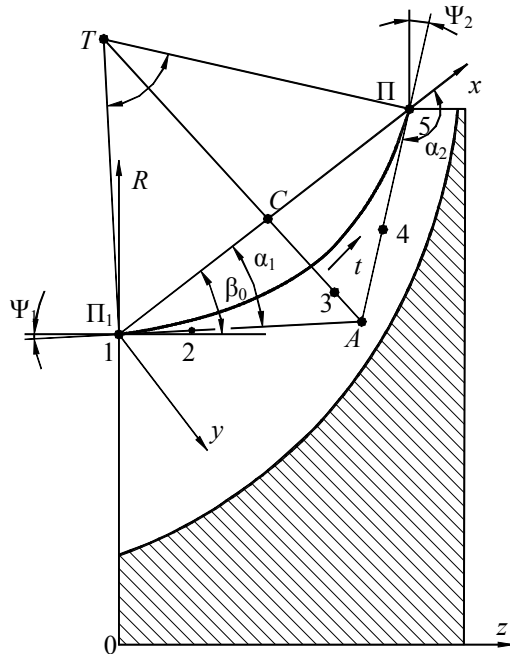


Рис. 2. Побудова зовнішньої границі меридіонального перетину робочого колеса

Виходячи із досвіду проектування робочих коліс можна задатися положенням п'яти вершин ламаної. Після визначення положення вершин ламаної лінії призначають значення вагових коефіцієнтів ω , які, в свою чергу, описують функціональну залежність (рис. 3). Інформації відносно функціональної залежності достатньо, щоб отримати її у вигляді поліному 6-го степеня:

$$\omega = At^6 + Bt^5 + Ct^4 + Dt^3 + Et^2 + Ft + G.$$

ω					t
1	0	1/4	2/4	3/4	1
1	0				1
1	0				1

Рис. 3. Можливі варіанти графіків функції $\omega = \omega(t)$

Для визначення невідомих коефіцієнтів полінома розв'язується система лінійних рівнянь.

Аналіз якості здобутих результатів моделювання кривої меридіонального обводу здійснюється за допомогою епюр першої та другої похідних, а також радіуса кривини кривої.

Геометричне моделювання лопатки робочого колеса починають з моделювання скелетної лінії лопатки на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса колеса (рис. 4). Профіль цієї лінії пропонується моделювати таким, що складається із двох сегментів раціональної кубічної кривої [2], яка описується рівнянням

$$R(\bar{P}, t) = \frac{\sum_{k=0}^3 \omega_k \cdot \bar{P}_k \cdot \Phi_{k,3}(t)}{\sum_{k=0}^3 \omega_k \cdot \Phi_{k,3}(t)}, 0 \leq t \leq 1,$$

де ω_k – індивідуальні ваги вершин триланковика; \bar{P}_k – функція компонент векторів вершин; $\Phi_{k,3}$ – багаточлен Бернштейна.

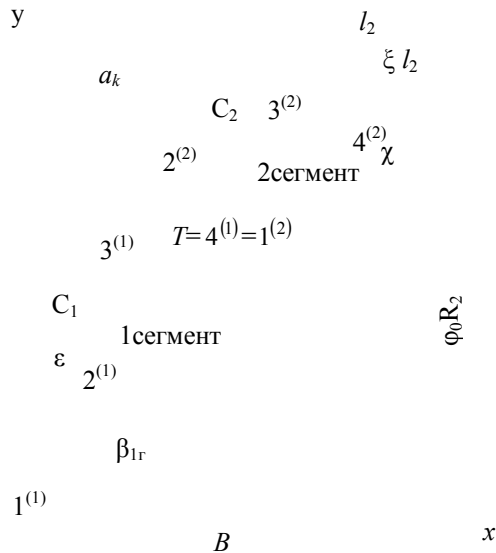


Рис. 4. Побудова середньої лінії лопатки робочого колеса на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса

Для попереднього аналізу якості змодельованої кривої автором отримано вирази для визначення перших й других похідних та кривини кривої.

Форма отриманої кривої та її характеристики залежать не тільки від положення вершин триланковика, а також від значень індивідуальних вагових коефіцієнтів ω_k у його вершинах. Суттєвий вплив на зміну форми кривої відбувається в межах вершин з відкоригованою вагою. Цей фактор є важливим при моделюванні відцентрових компресорів, особливо під час локального впливу на форму кривої з метою отримання задовільних епюр розподілу параметрів потоку.

З'єднання сегментів кривої здійснюється на колі горла каналу a_k , що автоматично забезпечує його величину та кут відгину профілю ϵ .

Аналіз якості змодельованої кривої здійснюється за допомогою епюр розподілу першої та другої похідних та кривини лінії.

Для отримання реального тілесного профілю лопатки задаються товщиною вхідної δ_1 та кінцевої δ_2 кромок, а також законом розподілу товщини профілю вздовж його середньої лінії. Зважаючи на те, що обриси тілесного профілю лопатки є дуже близькими до середньої лінії, то достатньо використати квадратичний закон змінення товщини. При такому підході задається в абсолютному вигляді тільки товщина δ_1 на вході в колесо.

Робоче колесо відцентрового компресора, яке наведено на рис. 1, було змодельоване з використанням наведеного методу.

Аналіз якості змодельованого каналу [3] здійснюється шляхом побудови ліній току, квазіортогоналей та еквіпотенціалей. Якщо характер проходження змодельованої кривої є незадовільним, тобто на ній мають місце перегини або відсутня монотонність тощо, то потрібно скорегувати значення геометричних параметрів, що визначають форму меридіонального перерізу, та повторити процес моделювання меридіональних обводів.

Наочне зображення про форму міжлопаткового каналу можна отримати з використанням множини плоских перерізів, які перпендикулярні осі компресора (рис. 5). Канал у перерізі уявляє собою трапецію, форма якої змінюється за ходом робочої речовини. На початку каналу вона має подовжену форму, яка розширюється від осі колеса до периферійного радіусу. В подальших перерізах трапеція змінюється зменшенням за висотою. Потрібно відзначити зміну просторового положення перерізів. Вони повертаються на кут, що дорівнює куту закрутки лопатки.

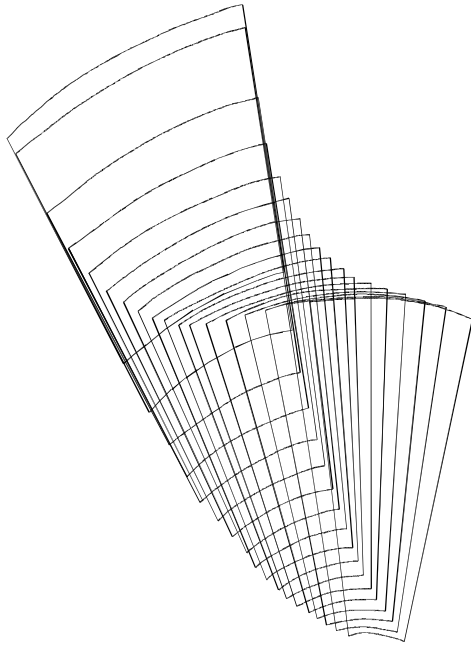


Рис. 5. Плоскі перерізи між лопаткового каналу робочого колеса

Під час побудови меридіональних обводів робочого колеса необхідно забезпечити не тільки цілесобразний закон змінення площ, але також і раціональний розподіл меридіональних швидкостей вздовж меж каналу. Такий розподіл може бути отриманий плавністю змінення кривини кривих внутрішньої та зовнішньої меж каналу. Якщо кривина кривої змінила знак, то на цій ділянці має місце малопомітна вм'ятинка. Відсутність плавного змінення кривини на поверхні відтворює шорсткість, тому потрібно отримати максимальний порядок гладкості кривої.

Всі перелічені вище положення дозволяють змодельовати меридіональні обводи робочого колеса відцентрового компресора із задовільними епюрами розподілу параметрів потоку. Однак остаточний висновок про ефективні показники робочого колеса, що прогножуються, можна зробити лише за результатами розрахунку просторової течії у ступені.

Висновки. 1. Проведений аналіз геометричних особливостей елементів проточних частин відцентрових компресорів показав необхідність розробки нових сучасних методів геометричного їх моделювання. 2. Використання кривих Безьє та їх модифікація ваговими коефіцієнтами дозволили отримати локальний вплив на форму кривої обводу для гнучкого моделювання меридіонального перетину робочого колеса. Використання раціональної кубічної кривої з введеними ваговими коефіцієнтами для моделювання середньої лінії лопатки робочого колеса на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса колеса дає змогу оказувати суттєвий вплив на зміну форми кривої з метою отримання задовільних епюр розподілу параметрів потоку у проточній частині. 3. Аналіз якості змодельованого каналу доводить ефективність наведених методів геометричного моделювання елементів проточних частин відцентрових компресорів.

1. Бідніченко О.Г. Геометричне моделювання робочих коліс відцентрових компресорів [Текст] / О.Г. Бідніченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Зб. наук. праць. Харк. держ. університет харчування та торгівлі. – Харків, 2007. – Вип. 20. – С. 14–18.
2. Бідніченко О.Г. Особливості геометричного моделювання з використанням раціональних кубічних кривих [Текст] / О.Г. Бідніченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці: Таврійський державний агротехнологічний університет. – Вип. 4, т. 42. – Мелітополь: ТГАТА, 2009. – С. 73–76.
3. Борисенко В.Д. Метод оцінювання якості міжлопаткового каналу робочих коліс відцентрових компресорів [Текст] / В.Д. Борисенко, О.Г. Бідніченко // Міжвідомчий науково-технічний збірник Прикладна геометрія та інженерна графіка. Вип. 84. – К.: КНУБА, 2010р. – С. 114–118.

А.І. Бондаренко

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНИХ ТРАНСМІСІЯХ

В роботі визначено вплив законів зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі та законів зміни гальмівного моменту на основні параметри гідрооб'ємно-механічних трансмісій різних структур (розглядалися дві схеми: одна з диференціалом на вході, друга – з диференціалом на виході) при реалізації процесу гальмування, а також проведено порівняльний аналіз теоретичних результатів з експериментальними.

Ключові слова: експериментальне дослідження, гідрооб'ємно-механічна трансмісія, гідрооб'ємна передача, гальмування.

А.И. Бондаренко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЯХ

В работе определено влияние законов изменения параметров регулирования гидромашины гидрообъемной передачи и законов изменения тормозного момента на основные параметры гидрообъемно-механических трансмиссий различных структур (рассматривались две схемы: одна с дифференциалом на входе, вторая - с дифференциалом на выходе) при реализации процесса торможения, а также проведен сравнительный анализ теоретических результатов с экспериментальными.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, гидрообъемно-механическая трансмиссия, гидрообъемная передача, торможение.

A. Bondarenko

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCHES OF WORKING PROCESSES IN HYDROSTATIC-MECHANICAL TRANSMISSION

In work certainly influence of laws of change of parameters of adjusting of hydraulic machine hydrostatic transmission and laws of change of brake moment on the basic parameters of hydrostatic-mechanical transmission of different structures (two charts were examined: one with a differential on the entrance, second - with a differential on an output) during realization of braking process. Set, how intensity of change of parameter of adjusting of hydraulic machine and change of brake moment influences on the overfall of working pressure in the hydrostatic transmission, angular speeds of billows, time, from the beginning of braking to the complete stop of billow of powder-like brake mechanism. The got results are analysed, comparison of theoretical results is made with experimental, an error is set boundary path by the maximal values of overfall of working pressure in the hydrostatic transmission, by twisting moments on the billows of transmissions and angular speeds of billows. A conclusion is done about expedience of the use of the examined mathematical model describing the dynamics of process of braking of hydrostatic-mechanical transmission.

Keywords: experimental research, hydrostatic-mechanical transmission, hydrostatic transmission, braking.

Постановка проблеми. Рішення задач, пов'язаних з дослідженням процесу гальмування, неможливе без використання адекватної математичної моделі. Результати теоретичного та експериментального дослідження відрізняються один від одного, проте більш достовірними, як правило, є результати, що отримані шляхом експериментальних досліджень. Саме базуючись на експериментальних даних і виконується перевірка адекватності розроблених або ж існуючих математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із літератури [1 – 4] відомо, що на кафедрі автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» розроблено лабораторний стенд, за допомогою якого може виконуватися комплексне експериментальне дослідження робочих процесів у гідрооб'ємно-механічних трансмісіях (ГОМТ) на різноманітних режимах роботи. Стенд швидко переналаштовується як на роботу за схемою «диференціал на виході», так і схемою «диференціал на вході».

В роботі [5] представлена математична модель процесу гальмування, яка вміщує опис ГОМТ, взаємодії коліс з опорною поверхнею, гальмівної системи, рух непідресорених і підресорених мас з урахуванням впливу підвіски і жорсткості шин дозволяє виявити та систематизувати вплив способів реалізації службового та екстреного гальмування (в тому числі із увімкненням в роботу антиблокувальної системи), умов експлуатації, законів натиснення на

педаля гальма та законів зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі (ГОП) на кінематичні, силові та енергетичні параметри ГОМТ різних структур, а також керованість та гальмівну ефективність. Проте, використання вище згаданої багатомасової нелінійної моделі процесу гальмування колісних тракторів з ГОМТ допустимо лише за наявності підтвердження адекватності математичної моделі ГОМТ.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою даної роботи є порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів в ГОМТ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити вплив законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП та законів зміни гальмівного моменту на основні параметри ГОМТ різних структур;
- скласти математичні моделі, що описують динаміку ГОМТ, які використовувалися у лабораторних стендах [3], при роботі в гальмівному режимі;
- провести порівняльний аналіз теоретичних результатів з експериментальними;
- зробити висновки, зокрема і про адекватність розглянутих математичних моделей ГОМТ.

Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів в ГОМТ.

Випробування виконуються на стендах, схема яких наведена в роботі [3], в два етапи:

- на першому етапі збирається схема ГОМТ з диференціалом на виході та виконується гальмування валу порошкового гальмівного механізму спочатку лише за рахунок зміни параметра регулювання гідронасосу e_1 (при різних законах $e_1(t)$), а потім одночасно за рахунок зміни гальмівного моменту M_g та параметра регулювання гідронасосу e_1 (при різних законах $M_g(t)$ та $e_1(t)$) зі збереженням в усіх випадках кінематичного зв'язку з електродвигуном;
- на другому етапі відбувається переналаштування стенду з метою отримання схеми ГОМТ з диференціалом на вході і вже для нової схеми реалізуються ті ж самі варіанти гальмування, що і для схеми ГОМТ з диференціалом на виході.

Значення гальмівного моменту M_g , що створюється порошковим гальмівним механізмом, на пряму залежить від напруги U_g , яка задається уручну за допомогою джерела живлення [3].

В зв'язку з тим, що використання ГОП в процесі гальмування відбувається у випадку виникнення необхідності лише знизити швидкість трактора, і в рідших випадках – добитися його повної зупинки, потреба в максимальному уповільненні відсутня. Саме тому час, за який змінюється e_1 від положення, що характеризується максимальною кутовою швидкістю вала порошкового гальмівного механізму, до положення, яке відповідає повній зупинці вала, приймаємо 10 та 20 секунд (позначимо даний час, як t_{e1}), залежність $e_1(t)$ носить лінійний характер. На порошковий гальмівний механізм подається напруга 0 В.

Гальмування одночасно за рахунок зміни гальмівного моменту M_g та параметра регулювання гідронасосу e_1 при збереженні кінематичного зв'язку з електродвигуном майже не використовується в процесі експлуатації самохідних машин з ГОМТ, а якщо і застосовується, то лише у випадку екстреного гальмування, тому час зміни гальмівного моменту від нульового (в якості нульового значення приймається момент 12 Нм – створюється порошковим гальмівним механізмом за відсутності керуючої напруги) до максимального значення (позначимо даний час, як t_{Mg}) повинен бути як найменшим, приємомо 0,5 секунд. Розглянемо додатково випадок, що імітує більш повільніше гальмування – зміна гальмівного моменту від нульового до максимального значення відбувається за 5 секунд. Останній випадок досліджується лише з метою в подальшому додатково перевірити адекватність математичної моделі ГОМТ в процесі гальмування. Напруга U_g , що подається на порошковий гальмівний механізм, в обох випадках (при $t_{Mg}=0,5$ секунд та $t_{Mg}=5$ секунд) змінюється від 0,5 В до 3,0 В з кроком 0,5 В. Залежність $M_g(t)$ носить лінійний характер.

Кожен вимір проводився 3 рази. Фіксація даних припинялася в момент повної зупинки вала порошкового гальмівного механізму (час від початку гальмування до зупинки вала порошкового гальмівного механізму позначимо як $t_{\omega g=0}$). Результати експериментальних досліджень (середні значення з максимальних: перепаду робочого тиску в ГОП $|\Delta P|_{\max}$; крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна $|M_0|_{\max}$ та на валу порошкового гальмівного механізму $|M_g|_{\max}$; кутової швидкості вала гідронасоса $|\omega_{e1*}|_{\max}$, вала гідромотора $|\omega_{e2*}|_{\max}$, асинхронного електродвигуна $|\omega_0|_{\max}$, порошкового гальмівного механізму $|\omega_g|_{\max}$) зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

t_{Mg} , с	t_{el} , с	U_g , В	$ \Delta P _{max}$, МПа	$ M_0 _{max}$, Нм	$ M_g _{max}$, Нм	$ \omega_{e1*} _{max}$, рад/с	$ \omega_{e2*} _{max}$, рад/с	$ \omega_0 _{max}$, рад/с	$ \omega_g _{max}$, рад/с	$t_{\omega g=0}$, с
ГОМТ з диференціалом на виході										
–	10,0	0	1,26	4,8	12,1	104,2	108,9	153,9	105,2	9,8
–	20,0	0	1,24	4,8	12,0	106,3	100,4	154,8	101,4	19,8
0,5	10,0	0,5	2,58	12,1	14,2	99,1	103,2	153,9	105,5	9,7
0,5	20,0	0,5	2,58	12,2	14,0	98,2	106,2	152,9	107,7	19,6
0,5	10,0	1,0	2,85	14,8	17,0	103,2	109,4	150,9	103,6	9,7
0,5	20,0	1,0	2,81	14,9	17,1	107,1	105,2	149,6	103,4	19,6
0,5	10,0	1,5	3,34	17,9	21,0	102,1	103,4	152,7	103,9	9,7
0,5	20,0	1,5	3,14	18,0	21,0	106,3	106,2	151,4	99,7	19,6
0,5	10,0	2,0	3,55	21,4	26,3	104,2	105,8	152,8	101,2	9,6
0,5	20,0	2,0	3,55	21,4	26,0	100,1	104,2	151,4	103,5	19,6
0,5	10,0	2,5	4,42	22,8	31,0	97,3	105,3	152,3	104,4	9,5
0,5	20,0	2,5	4,40	22,7	31,2	95,6	109,3	153,1	107,8	19,4
0,5	10,0	3,0	4,80	30,2	40,0	102,4	108,2	150,2	109,7	9,4
0,5	20,0	3,0	4,79	30,9	40,0	106,1	107,3	148,4	108,7	18,8
5,0	10,0	0,5	2,40	5,7	14,0	101,9	107,2	155,7	106,4	9,8
5,0	20,0	0,5	2,39	5,9	14,0	101,7	107,1	155,1	102,4	19,8
5,0	10,0	1,0	2,70	7,8	17,0	100,3	107,0	148,7	103,9	9,8
5,0	20,0	1,0	2,68	7,9	17,2	103,2	106,6	149,3	108,1	19,7
5,0	10,0	1,5	3,24	8,4	21,0	99,7	106,2	155,4	99,7	9,7
5,0	20,0	1,5	3,14	8,6	21,0	101,2	106,4	153,0	101,2	19,7
5,0	10,0	2,0	3,51	10,1	26,0	97,1	106,8	150,7	102,4	9,6
5,0	20,0	2,0	3,50	10,2	26,0	99,2	106,4	151,0	103,2	19,6
5,0	10,0	2,5	4,38	10,9	30,5	98,2	106,1	147,5	105,4	9,5
5,0	20,0	2,5	4,12	10,8	31,0	103,4	105,4	148,9	107,8	19,4
5,0	10,0	3,0	4,80	14,8	40,0	98,8	104,4	152,9	103,6	9,4
5,0	20,0	3,0	4,78	14,8	40,3	110,1	103,9	151,4	108,7	19,2
ГОМТ з диференціалом на виході										
–	10,0	0	1,08	8,8	12,0	159,9	108,9	155,2	105,4	9,8
–	20,0	0	1,06	8,8	12,0	162,1	108,1	151,4	103,7	19,8
0,5	10,0	0,5	6,39	22,9	14,0	143,2	108,5	154,4	105,7	9,8
0,5	20,0	0,5	6,38	23,0	14,0	145,3	106,5	153,2	105,9	19,7
0,5	10,0	1,0	7,62	24,9	17,0	149,8	106,9	155,2	101,2	9,7
0,5	20,0	1,0	7,61	24,9	17,2	151,1	107,8	154,3	103,8	19,7
0,5	10,0	1,5	8,98	30,1	21,0	152,3	108,4	152,9	99,4	9,7
0,5	20,0	1,5	8,97	30,4	21,0	155,2	109,9	148,2	102,5	19,7
0,5	10,0	2,0	10,93	34,8	26,0	157,2	110,4	150,1	108,0	9,6
0,5	20,0	2,0	10,91	35,1	26,3	159,3	109,7	152,4	110,4	19,6
0,5	10,0	2,5	12,48	39,1	31,0	160,4	108,1	152,9	108,9	9,5
0,5	20,0	2,5	11,93	42,2	31,3	155,3	106,9	150,4	99,8	19,4
0,5	10,0	3,0	14,78	47,6	40,0	153,2	107,3	147,6	97,4	9,4
0,5	20,0	3,0	14,73	47,9	40,0	151,1	108,0	148,4	103,7	19,2
5,0	10,0	0,5	4,51	9,8	14,0	149,3	109,4	149,2	101,8	9,8
5,0	20,0	0,5	4,50	10,0	14,2	149,8	110,6	155,5	104,4	19,8
5,0	10,0	1,0	5,01	13,0	17,0	150,1	108,9	153,9	107,1	9,8
5,0	20,0	1,0	5,00	13,0	17,0	152,2	105,5	153,2	99,9	19,7
5,0	10,0	1,5	6,11	13,2	21,0	147,4	108,1	153,1	101,7	9,7
5,0	20,0	1,5	6,07	13,4	20,0	145,4	107,5	153,0	102,4	19,7
5,0	10,0	2,0	7,76	14,2	25,0	144,3	109,4	148,1	104,5	9,6
5,0	20,0	2,0	7,72	14,3	26,0	149,2	108,2	154,0	106,1	19,6
5,0	10,0	2,5	8,54	15,9	31,2	147,2	108,1	139,7	103,2	9,5
5,0	20,0	2,5	8,49	16,0	31,0	143,2	108,0	154,4	104,5	19,4
5,0	10,0	3,0	11,30	19,8	40,0	145,2	107,5	155,2	103,1	9,4
5,0	20,0	3,0	11,20	19,9	40,0	147,1	108,3	153,1	107,3	19,0

Теоретичне моделювання процесу гальмування не можливе без наявності інформації стосовно функціональної залежності між керуючим сигналом U_g та гальмівним моментом M_g на валу поршкового гальмівного механізму. В процесі теоретичного дослідження максимальне значення створюваного гальмівного моменту M_g для кожного значення керуючого сигналу бралось саме із результатів, що отримані експериментальним шляхом, закони зміни $M_g(t)$ (як теоретичний, так і експериментальний) при цьому максимально зберегли наближеність один до одного.

В якості енергетичного джерела в стендах застосовувався асинхронний електродвигун А2-72-411 [3]. Асинхронні електродвигуни вже протягом багатьох десятиріч широко використовуються в майже усіх галузях промисловості. Вони є незамінними в приводах токарних і свердлувальних верстатів, циркулярних пил пилорам, підйомних кранів і лебідок, ліфтів в житлових будинках, у сільському господарстві для приводу віялок, барабанів молотарок, зерноавантажувачів і т.п. Саме тому моделювання роботи складних систем з асинхронними електродвигунами, дослідження динаміки таких електродвигунів є постійно актуальним питанням [6 – 9], навіть в підсистемі Simulink програми Matlab в бібліотеці демонстраційних моделей наведена динамічна модель асинхронного електродвигуна. Моделювання роботи асинхронного електродвигуна [3] буде відбуватися з використанням стандартної моделі з Matlab.

Математичні моделі, що описують зміну кінематичних та силових параметрів в ГОМТ з диференціалом на виході та диференціалом на вході наведені нижче (для схеми ГОМТ з диференціалом на виході математична модель описується системою рівнянь (1), (3), для ГОМТ з диференціалом на вході – системою рівнянь (2), (4)), розрахункові схеми ГОМТ наведені на рис. 1.

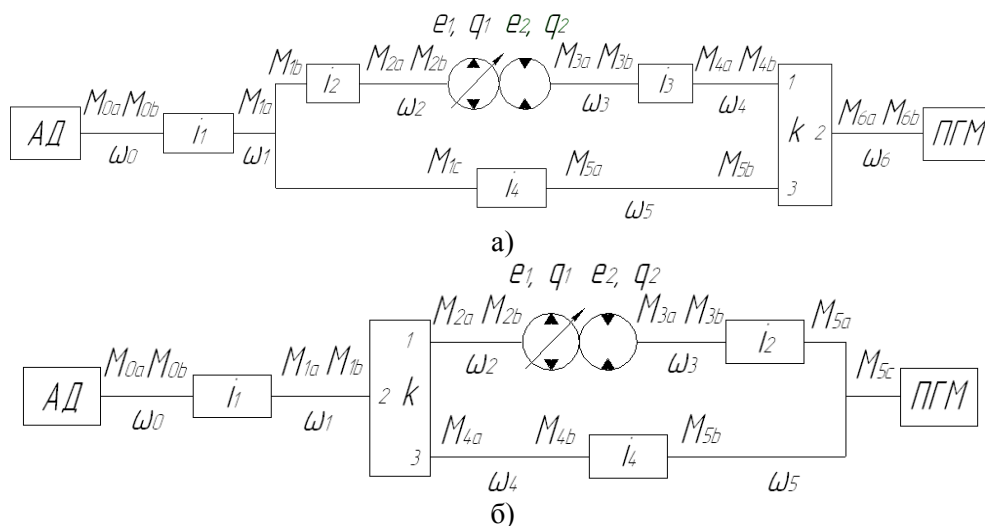


Рис. 1. Розрахункові схеми ГОМТ: а – з диференціал на виході; б – з диференціал на вході; АД – асинхронний електродвигун; ПГМ – порошковий гальмівний механізм.

Система рівнянь, що описує зміну кутових прискорень елементів трансмісії:
– ГОМТ з диференціалом на виході:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_0 \cdot i_1 - \dot{\omega}_1 = 0; & \dot{\omega}_1 \cdot i_2 - \dot{\omega}_2 = 0; \\ \dot{\omega}_1 \cdot i_4 - \dot{\omega}_5 = 0; \\ e_1 \cdot q_1 \cdot \dot{\omega}_2 + q_1 \cdot \omega_2 \cdot \dot{e}_1 - e_2 \cdot q_2 \cdot \dot{\omega}_3 - q_2 \cdot \omega_3 \cdot \dot{e}_2 = \\ = \left(\frac{K_{1y}}{\mu} \cdot (1 + C_{1y} \cdot |\omega_2|) + \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot (1 + C_{2y} \cdot |\omega_3|) \right) \cdot \Delta P + \\ + \left(\frac{K_{1y}}{\mu} \cdot C_{1y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_2| + \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot C_{2y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_3| \right) \cdot \Delta P; \\ \dot{\omega}_3 \cdot i_3 - \dot{\omega}_4 = 0; & \dot{\omega}_4 - k \cdot \dot{\omega}_6 + (k - 1) \cdot \dot{\omega}_5 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

– ГОМТ з диференціалом на вході:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_0 \cdot i_1 - \dot{\omega}_1 = 0; \\ \dot{\omega}_2 - k \cdot \dot{\omega}_1 + (k-1) \cdot \dot{\omega}_4 = 0; \\ e_1 \cdot q_1 \cdot \dot{\omega}_2 + q_1 \cdot \omega_2 \cdot \dot{e}_1 - e_2 \cdot q_2 \cdot \dot{\omega}_3 - q_2 \cdot \omega_3 \cdot \dot{e}_2 = \\ = \left(\frac{K_{1y}}{\mu} \cdot (1 + C_{1y} \cdot |\omega_2|) + \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot (1 + C_{2y} \cdot |\omega_3|) \right) \cdot \Delta P + \\ + \left(\frac{K_{1y}}{\mu} \cdot C_{1y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_2| + \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot C_{2y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_3| \right) \cdot \Delta P; \\ \dot{\omega}_3 \cdot i_2 - \dot{\omega}_5 = 0; \quad \dot{\omega}_4 \cdot i_4 - \dot{\omega}_5 = 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

де $\dot{\omega}_0$ – кутове прискорення валу електродвигуна;

i_j – передавальне відношення редуктора;

$\dot{\omega}_i$ – кутове прискорення ланки;

k – внутрішнє передавальне відношення планетарного ряду [10 – 13];

e_1, e_2 – параметри регулювання ГОП;

q_1, q_2 – максимальна продуктивність гідромашин;

K_{iy}, C_{iy} – коефіцієнти втрат для гідронасоса ($i=1$) і для гідромотора ($i=2$);

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

ΔP – перепад робочого тиску в ГОП;

Силкові параметри трансмісії описуються системою наступних рівнянь:

– ГОМТ з диференціалом на виході:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{0b} \cdot \eta_1^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{0b})} + i_1 \cdot M_{1a} = 0; \quad M_{1b} \cdot \eta_2^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{1b})} + i_2 \cdot M_{2a} = 0; \\ M_{2b} - e_1 \cdot q_1 \cdot \Delta P = -\Delta M_1 \cdot \text{sign}(\omega_2); \\ M_{3a} + e_2 \cdot q_2 \cdot \Delta P = -\Delta M_2 \cdot \text{sign}(\omega_3); \\ M_{3b} \cdot \eta_3^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{3b})} + i_3 \cdot M_{4a} = 0; \quad M_{1c} \cdot \eta_4^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{1c})} + i_4 \cdot M_{5a} = 0; \\ M_{4b} \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4b})} + M_{6a} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{6a})} + M_{5b} = 0; \\ M_{4b} \cdot k \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4b})} + M_{6a} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{6a})} = 0; \quad M_{0a} + M_{0b} = 0; \\ M_{1a} + M_{1b} + M_{1c} = 0; \quad M_{2a} + M_{2b} = 0; \quad M_{3a} + M_{3b} = 0; \\ M_{4a} + M_{4b} = 0; \quad M_{5a} + M_{5b} = 0; \quad M_{6a} + M_{6b} = 0; \quad M_{6b} = M_g(t); \end{array} \right. \quad (3)$$

– ГОМТ з диференціалом на вході:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{0b} \cdot \eta_1^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{0b})} + i_1 \cdot M_{1a} = 0; \\ M_{2a} \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{2a})} + M_{1b} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{1b})} + M_{4a} = 0; \\ M_{2a} \cdot k \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{2a})} + M_{1b} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{1b})} = 0; \\ M_{2b} - e_1 \cdot q_1 \cdot \Delta P = -\Delta M_1 \cdot \text{sign}(\omega_2); \\ M_{3a} + e_2 \cdot q_2 \cdot \Delta P = -\Delta M_2 \cdot \text{sign}(\omega_3); \\ M_{3b} \cdot \eta_3^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{3b})} + i_2 \cdot M_{5a} = 0; \quad M_{4b} \cdot \eta_4^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4b})} + i_4 \cdot M_{5b} = 0; \\ M_{0a} + M_{0b} = 0; \quad M_{1a} + M_{1b} = 0; \\ M_{2a} + M_{2b} = 0; \quad M_{3a} + M_{3b} = 0; \quad M_{4a} + M_{4b} = 0; \\ M_{5a} + M_{5b} + M_{5c} = 0; \quad M_{5c} = M_g(t). \end{array} \right. \quad (4)$$

де M_{nm} – моменти на ланках ГОМТ; m – індекс-число співпадає з номером кутової швидкості ланки; n – індекси-букви відповідають моментам на кінцях ланок;

η_j – коефіцієнт корисної дії редуктора;

Θ – коефіцієнт урахування втрат в зубчастих зачепленнях ($\Theta=0$ – без урахування втрат, $\Theta=-1$ з урахуванням втрат в зубчастих зачепленнях);

N_{nm} – потужність, що передається ланками ГОМТ (добуток кутових швидкостей на відповідні моменти з урахуванням знаку дають величину і напрям потоків потужності на конкретних ланках і елементах ГОМТ);

$\Delta M_1, \Delta M_2$ – втрати моменту в гідромашинах, що обчислюються, наприклад, згідно математичної моделі втрат К.І. Городецького [10 – 13], як функції параметрів регулювання, кутової швидкості валів гідромашин, робочих об'ємів q_1, q_2 і перепаду тиску ΔP ;

η_{13}, η_{23} – ККД в зубчатих зачепленнях сонце-сателіт та епіцикл-сателіт при зупиненому водилі, що визначають втрати моментів.

Для порівняння експериментальних результатів з теоретичними вираховані в процесі кожного дослідження максимальні значення: перепаду робочого тиску в ГОП $|\Delta P|_{\max}$; крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна $|M_0|_{\max}=|M_{0a}|_{\max}$ та на валу порошкового гальмівного механізму $|M_g|_{\max}$ ($|M_g|_{\max}=|M_{6b}|_{\max}$ – для ГОМТ з диференціалом на виході, ($|M_g|_{\max}=|M_{5c}|_{\max}$ – для ГОМТ з диференціалом на вході); кутової швидкості вала гідронасоса $|\omega_{e1*}|_{\max}=|\omega_2|_{\max}$, вала гідромотора $|\omega_{e2*}|_{\max}=|\omega_3|_{\max}$, асинхронного електродвигуна $|\omega_0|_{\max}$, порошкового гальмівного механізму $|\omega_g|_{\max}$ ($|\omega_g|_{\max}=|\omega_6|_{\max}$ – для ГОМТ з диференціалом на виході, $|\omega_g|_{\max}=|\omega_5|_{\max}$ – для ГОМТ з диференціалом на вході), а також встановлено час від початку гальмування до зупинки вала порошкового гальмівного механізму $t_{\omega g=0}$ (табл. 2) за допомогою програмної реалізації, що розроблена в системі Matlab, а точніше – підсистемі моделювання динамічних процесів Simulink.

Таблиця 2

Результати теоретичних досліджень

$t_{Mg},$ с	$t_{el},$ с	$U_g,$ В	$ \Delta P _{\max},$ МПа	$ M_0 _{\max},$ Нм	$ M_g _{\max},$ Нм	$ \omega_{e1*} _{\max},$ рад/с	$ \omega_{e2*} _{\max},$ рад/с	$ \omega_0 _{\max},$ рад/с	$ \omega_g _{\max},$ рад/с	$t_{\omega g=0},$ с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ГОМТ з диференціалом на виході										
–	10,0	0	1,15	4,4	12,0	102,0	106,4	152,9	103,6	9,9
–	20,0	0	1,14	4,6	12,0	102,0	106,4	152,9	103,6	19,9
0,5	10,0	0,5	2,37	12,7	14,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,8
0,5	20,0	0,5	2,36	12,9	14,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,8
0,5	10,0	1,0	2,66	14,5	17,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,8
0,5	20,0	1,0	2,65	14,7	17,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,7
0,5	10,0	1,5	3,05	17,0	21,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,7
0,5	20,0	1,5	3,04	17,3	21,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,7
0,5	10,0	2,0	3,54	20,0	26,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,6
0,5	20,0	2,0	3,53	20,3	26,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,6
0,5	10,0	2,5	4,03	23,2	31,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,5
0,5	20,0	2,5	4,02	23,4	31,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,4
0,5	10,0	3,0	4,90	28,7	40,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,4
0,5	20,0	3,0	4,89	28,9	40,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,2
5,0	10,0	0,5	2,36	6,2	14,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,8
5,0	20,0	0,5	2,35	6,4	14,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,8
5,0	10,0	1,0	2,65	7,1	17,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,8
5,0	20,0	1,0	2,64	7,3	17,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,7
5,0	10,0	1,5	3,04	8,4	21,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,7
5,0	20,0	1,5	3,03	8,6	21,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,7
5,0	10,0	2,0	3,52	9,9	26,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,6
5,0	20,0	2,0	3,51	10,1	26,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,6
5,0	10,0	2,5	4,00	11,5	31,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,5
5,0	20,0	2,5	3,99	11,6	31,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,4
5,0	10,0	3,0	4,85	14,3	40,0	101,9	106,4	152,9	103,6	9,4
5,0	20,0	3,0	4,84	14,5	40,0	101,9	106,4	152,9	103,6	19,2
ГОМТ з диференціалом на вході										
–	10,0	0	1,00	8,9	12,0	149,8	108,5	152,9	105,1	9,9
–	20,0	0	0,99	8,9	12,0	150,0	108,5	153,0	105,1	19,9
0,5	10,0	0,5	6,36	21,9	14,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,8
0,5	20,0	0,5	6,35	22,0	14,0	149,8	108,5	152,9	105,1	19,8
0,5	10,0	1,0	7,33	24,8	17,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,8
0,5	20,0	1,0	7,32	24,9	17,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,7

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	10,0	1,5	8,62	28,8	21,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,7
0,5	20,0	1,5	8,61	30,0	21,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,7
0,5	10,0	2,0	10,24	33,7	26,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,6
0,5	20,0	2,0	10,23	33,9	26,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,6
0,5	10,0	2,5	11,86	38,7	31,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,5
0,5	20,0	2,5	11,85	38,9	31,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,4
0,5	10,0	3,0	14,77	47,6	40,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,4
0,5	20,0	3,0	14,76	47,8	40,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,2
0,5	10,0	0,5	4,36	9,9	14,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,8
0,5	20,0	0,5	4,35	10,0	14,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,8
0,5	10,0	1,0	5,05	11,9	17,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,8
0,5	20,0	1,0	5,04	12,0	17,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,7
0,5	10,0	1,5	5,98	12,3	21,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,7
0,5	20,0	1,5	5,97	12,5	21,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,7
0,5	10,0	2,0	7,14	14,0	26,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,6
0,5	20,0	2,0	7,13	14,2	26,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,6
0,5	10,0	2,5	8,30	15,8	31,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,5
0,5	20,0	2,5	8,29	15,8	31,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,4
0,5	10,0	3,0	10,40	19,1	40,0	149,8	108,5	153,0	105,1	9,4
0,5	20,0	3,0	10,40	19,2	40,0	149,8	108,5	153,0	105,1	19,2

В зв'язку з тим, що в математичну модель порошкового гальмівного механізму закладено результати, які отримані шляхом експериментальних досліджень ГОМТ, розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями крутного моменту на валу порошкового гальмівного механізму $|M_g|_{\max}$ не перевищує 1,41%.

З метою збереження працездатності стендів, максимальний гальмівний момент задавався $M_g=40$ Нм. Збільшення гальмівного моменту M_g призводить до зменшення часу від початку гальмування до повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму $t_{\omega g=0}$ та суттєвого підвищення перепаду робочого тиску в ГОП ΔP

Висновки.

1. В результаті експериментального дослідження було встановлено, що чим нижче інтенсивність зміни параметра регулювання гідронасоса та повільніше наростання гальмівного моменту, тим менше перепад робочого тиску в ГОП, на інші параметри розглянутих ГОМТ закони $e_1(t)$ та $M_g(t)$ в процесі гальмування суттєво не впливали.

2. Збільшення гальмівного моменту призводить до зменшення часу від початку гальмування до повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму та суттєвого підвищення перепаду робочого тиску в ГОП.

3. В результаті порівняння теоретичних результатів з експериментальними, не залежно від схеми ГОМТ, було встановлено:

– найбільша похибка не перевищує 8,82% [14] при визначенні максимального перепаду робочого тиску в ГОП, 8,97% – для крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна, 7,46% – для кутової швидкості вала гідронасоса, 2,74% – для кутової швидкості вала гідромотора, 1,80% – для кутової швидкості вала асинхронного електродвигуна, 5,56% – для кутової швидкості вала порошкового гальмівного механізму, 2,13% – для часу від початку гальмування до повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму (в математичну модель порошкового гальмівного механізму в якості початкових даних закладено закон зміни гальмівного моменту аналогічний тому, який отримано в результаті експериментальних досліджень);

– найбільша похибка не перевищує 5,93% при визначенні максимального перепаду робочого тиску в ГОП, 6,01% – для крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна, 1,12% – для кутової швидкості вала гідронасоса, 2,71% – для кутової швидкості вала гідромотора, 4,93% – для кутової швидкості вала порошкового гальмівного механізму (в математичну модель в якості початкових даних закладено закон зміни гальмівного моменту та закон зміни кутової швидкості вала асинхронного електродвигуна, які були отримані шляхом експериментальних досліджень).

4. Експериментальним шляхом в лабораторних умовах повністю доведена адекватність математичних моделей ГОМТ (1) – (4), що використовувалися для теоретичного моделювання

роботи стенду в гальмівному режимі. Саме цей підхід [10] для складання математичних моделей рекомендується і для опису ГОМТ в ході моделювання процесу гальмування трактора.

1. Митцель Н.А. Датчик крутящего момента / Н.А. Митцель // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 48 (1090). – С. 3 – 9.
2. Кожушко А.П. Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів у безступінчатих гідрооб'ємно-механічних трансмісіях // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства», 21 – 22 листопада 2014 р., м. Кам'янець-Подільський / Міністерство аграрної політики та продовольства України, Подільський державний аграрно-технічний університет. – Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С. 181 – 184.
3. Самородов В.Б. Експериментальне дослідження робочих процесів у гідрооб'ємно-механічних трансмісіях з диференціалом на вході та з диференціалом на виході / В.Б. Самородов, А.І. Бондаренко // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – № 39. – С. 60 – 67.
4. Samorodov V.B. Experimental Appropriateness Verification of K. Gorodetsky's Mathematical Model for Losses Determination in Hydrostatic Transmissions for Modern Hydraulic Machines / V.B. Samorodov, S.A. Shuba, O.I. Derkach, V.M. Shevtsov, N.A. Mittsel // Eastern European Scientific Journal: Düsseldorf (Germany): Auris Verlag. – 2014. – № 6. – P. 285 – 291.
5. Бондаренко А.І. Просторова математична модель процесу гальмування колісного трактора FENDT 926 VARIO / А.І. Бондаренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Математика та кібернетика – фундаментальні та прикладні аспекти. – 2011. – № 5/4 (53). – С. 47 – 51.
6. Омельченко Е.Я. Моделирование на ЭВМ переходных процессов в асинхронном электроприводе / Е.Я. Омельченко, А.В. Харламов // Электротехнические системы и комплексы. – 1998. – № 4. – С. 36 – 42.
7. Омельченко Е.Я. Математическая модель асинхронного электродвигателя с фазным ротором / Е.Я. Омельченко // Электротехнические системы и комплексы. – 2006. – № 12. – С. 100 – 108.
8. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И.А. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
9. Ковач К. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. Ковач, И. Рац. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 74 с.
10. Рогов А.В. Развитие методов расчета систем «двигатель – трансмиссия» автомобилей и тракторов: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 «Автомобілі та трактори» / Рогов Андрей Владимирович. – Харків, 2006. – 168 с.
11. Самородов В.Б. Методика плотной упаковки матричных систем, моделирующих работу гидрообъемно-механических трансмиссий / В.Б. Самородов, А.В. Рогов, М.Б. Бурлыга // Автомобильный транспорт. – 2003. – № 13. – С. 91 – 98.
12. Самородов В.Б. Основы теории автоматизированной генерации математических моделей трансмиссий / В.Б. Самородов // Механика и машиностроение. – 1998. – №1. – С. 109 – 115.
13. Самородов В.Б. Вывод кинематических базисных матриц и системный анализ кинематики ступенчатых механических и гидрообъемно-механических трансмиссий / В.Б. Самородов // Сборник научных трудов ХГПУ. – 1999. – №.7 – Ч. 2. – С. 363 – 370.
14. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений: учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: «Наука», 1970. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2014.

В.Д. Борисенко, І.В. Устенко

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МОДИФІКАЦІЯ СПЛАЙНОВИХ КРИВИХ CATMULL-ROM

У статті розглядається питання модифікації сплайнових кривих Catmull-Rom шляхом визначення похідних із застосуванням центральних різниць. Похідні використовуються при побудові цих кривих, поширених в комп'ютерній графіці.

Ключові слова: сплайнові криві, модифікація, уточнення похідних, центральні різниці, комп'ютерна графіка.

Рис. 2. Літ. 7.

В.Д. Борисенко, І.В. Устенко

МОДИФИКАЦИЯ СПЛАЙНОВЫХ КРИВЫХ CATMULL-ROM

В статье рассматривается вопрос модификации сплайновых кривых Catmull-Rom путем определения производных с применением центральных разностей. Производные используются при построении сплайновых кривых, распространенных в компьютерной графике.

Ключевые слова: сплайновые кривые, модификация, уточнение производных, центральные разности, компьютерная графика.

V.D. Borisenko, I.V. Ustenko

MODIFICATION SPLINE CURVES CATMULL-ROM

The article discusses the modification of spline curves Catmull-Rom by determining derivatives using central differences. Derivatives are used in the construction of spline curves, common in computer graphics.

Keywords: spline curves, modification, refinement derivatives, central differences, computer graphics.

Постановка проблеми. Криві лінії знаходять широке застосування в науці й техніці. Ними описуються внутрішні й зовнішні обводи різноманітних виробів, подаються результати теоретичних і експериментальних досліджень тощо. Важливу роль криві відіграють при візуалізації анімаційних сцен. Незважаючи на те, що фахівцями з прикладної геометрії та суміжних з нею галузей науки розроблено достатньо методів подання кривих, все ж таки і на цей час існують практичні завдання, які вимагають розробки нових або модифікації існуючих методів моделювання кривих ліній. В повній мірі це відноситься і до сплайнових кривих Catmull-Rom.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що при моделюванні кривих ліній широко застосовуються різноманітні сплайни. В сучасній літературі з питань прикладної геометрії [1–5, 7] пропонується достатньо різних варіантів сплайнових кривих, які відрізняються певними властивостями та способами побудови. Одними з подібних сплайнів є сплайнові криві Catmull-Rom [6]. Ці криві знайшли широке застосування в комп'ютерній графіці, зокрема при розв'язанні питань, пов'язаних з анімацією. Вони відносяться до інтерполяційних кривих і проходять через задані базові точки. Математично сплайнові криві Catmull-Rom визначаються параметричними рівняннями третього степеня, мають неперервну першу похідну та розривну другу. Їх застосовують при побудові як замкнутих, так і розімкнутих кривих. Цим сплайновим кривим притаманний локальний характер. Вони будуються по чотирьох значеннях деякої функції, заданої в чотирьох сусідніх точках (двох зліва та двох справа), тобто вони залежать тільки від значень функції в чотирьох сусідніх точках.

Метою дослідження є розробка, реалізація та візуалізація на ПЕОМ модифікованих сплайнових кривих, які відрізняються від оригінальних кривих іншим підходом до визначення похідних в суміжних точках.

Основні результати дослідження. Для кращого розуміння заходів, запропонованих в плані модифікації сплайнових кривих Catmull-Rom, розглянемо їх формування в оригінальній постановці. Візьмемо для прикладу триланкову ламану, яка подається чотирма вершинами, і проведемо через вершини $\bar{P}_0, \bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ сплайнову криву Catmull-Rom (рис. 1). Специфікою цієї сплайнової кривої є те, що за чотирьох заданих вершин цей сплайн можна побудувати лише на ділянці між точками \bar{P}_1 і \bar{P}_2 .

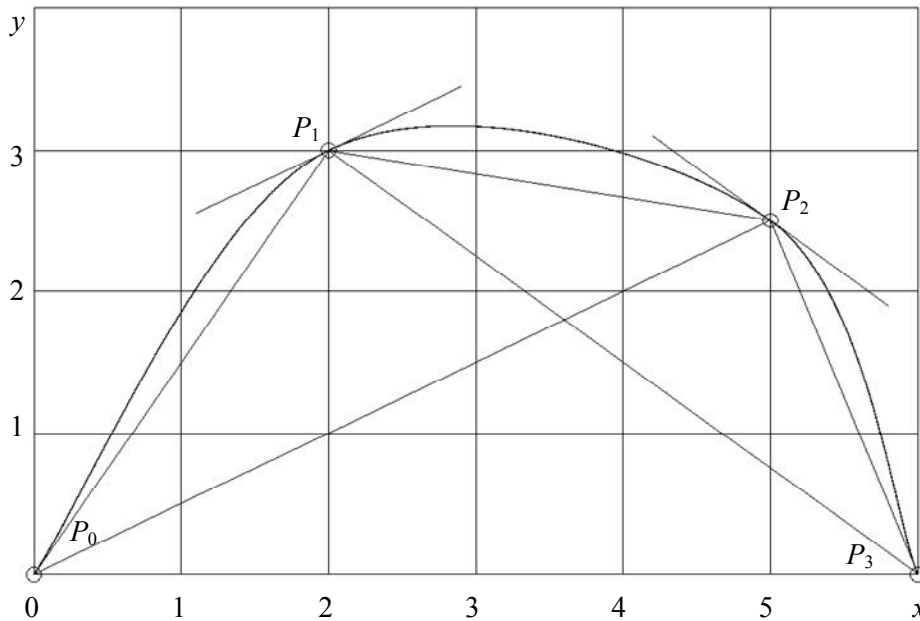


Рис. 1. Сплайнова крива Catmull-Rom

Параметрична крива Catmull-Rom, що проходить через вершини P_1 і P_2 триланкової ламаної, описується поліномами третього степеня:

$$\begin{aligned} R_x(t) &= a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x; \\ R_y(t) &= a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y, \end{aligned} \quad (1)$$

де t – параметр, який варіюється у межах від 0 до 1, в точці P_1 він дорівнює нулю, а в точці P_2 – одиниці.

Для знаходження невідомих коефіцієнтів у виразах (1) застосовуються координати й похідні в точках P_1 і P_2 . Особливістю побудови кривої Catmull-Rom є своєрідний підхід до визначення похідних. Так, в точці P_1 похідна знаходиться, спираючись на значення координат точок P_0 і P_2 . Авторами цієї сплайнової кривої при визначенні похідної додатково вводиться деякий коефіцієнт m , названий ними коефіцієнтом напруження. Отже, похідна в точці P_1 визначається наступним чином:

$$\frac{dR_x(t)}{dt} = m(x_2 - x_0); \quad \frac{dR_y(t)}{dt} = m(y_2 - y_0). \quad (2)$$

Для кінцевої точки ділянки, тобто точки P_2 вирази (2) матимуть вигляд:

$$\frac{dR_x(t)}{dt} = m(x_3 - x_1); \quad \frac{dR_y(t)}{dt} = m(y_3 - y_1). \quad (3)$$

На рис. 1 у точках P_1 і P_2 проведені відрізки прямих, дотично до яких будується сплайнова крива Catmull-Rom. Ці відрізки паралельні відповідним діагоналям лоскості ої ламаної P_0P_1 і P_2P_3 . Згідно з виразами (2) і (3) довжини цих відрізків залежать також і від коефіцієнта напруження m .

Диференціюванням залежностей (1) отримаємо:

$$\frac{dR_x(t)}{dt} = 3a_x t^2 + 2b_x t + c_x; \quad \frac{dR_y(t)}{dt} = 3a_y t^2 + 2b_y t + c_y.$$

За додаткові умови для визначення коефіцієнтів виразу $R_x(t)$ треба взяти наступні:

у точці P_1

$$\begin{aligned} R_x(0) &= x_1; \\ \frac{dR_x(0)}{dt} &= m(x_2 - x_0); \end{aligned}$$

у точці P_2

$$R_x(1) = x_2;$$

$$\frac{dR_x(1)}{dt} = m(x_3 - x_1).$$

Ці додаткові умови дозволяють сформувати систему рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів, необхідних для розрахунку $R_x(t)$ на ділянці між точками P_1 і P_2 :

$$d_x = x_1;$$

$$a_x + b_x + c_x + d_x = x_2;$$

$$c_x = m(x_2 - x_0);$$

$$3a_x + 2b_x + c_x = m(x_3 - x_1).$$
(4)

У результаті розв'язання цієї системи рівнянь матимемо:

$$a_x = m(x_3 - x_1) + m(x_2 - x_0) - 2(x_2 - x_1);$$

$$b_x = m(x_3 - x_1) - 2m(x_2 - x_0) + 3(x_2 - x_1).$$

Після перетворень можна отримати наступний вираз для визначення $R_x(t)$:

$$R_x(t) = mt(-t^2 + 2t - 1)x_0 + ((2 - m)t^3 + (m - 3)t^2 + 1)x_1 +$$

$$+ ((m - 2)t^3 + (3 - 2m)t^2 + mt)x_2 + mt^2(t - 1)x_3.$$
(5)

Якщо подібні дії виконати по відношенню до залежності $R_y(t)$, то буде отримано вираз, подібний (5), для розрахунку ординат сплайнової кривої.

З розгляду виразу (5) випливає, що при варіюванні параметра t у межах від 0 до 1 сплайнова крива Catmull-Rom буде побудована між точками P_1 і P_2 . Вона точно проходить через ці вершини ламаної. Отримана крива є геометрично неперервною, але набір базових функцій однозначно визначає її форму. Тобто немає ніяких можливостей впливати на характер проходження цієї сплайнової кривої.

Сплайнова крива Catmull-Rom є інтерполяційною. Вона проходить через кожен базову точку. Але цілком слушним виникає питання щодо проведення кривої на ділянках P_0P_1 і P_2P_3 . Воно розв'язується додаванням до масиву із чотирьох точок ще двох компонент \bar{P}_{-1} і \bar{P}_4 за таких умов:

$$\bar{P}_{-1} = \bar{P}_0 \text{ і } \bar{P}_4 = \bar{P}_3.$$

Таким чином, для отримання сплайнової кривої Catmull-Rom, показаної на рис. 1, її необхідно будувати окремо для ділянок $\bar{P}_{-1}\bar{P}_0\bar{P}_1\bar{P}_2$, $\bar{P}_0\bar{P}_1\bar{P}_2\bar{P}_3$ і $\bar{P}_1\bar{P}_2\bar{P}_3\bar{P}_4$.

Сплайнова крива Catmull-Rom, що показана на рис. 1, була побудована із застосуванням рівняння, отриманого з виразу (5), в якому коефіцієнт m дорівнював 0,5 (саме це значення коефіцієнта напруження знайшло поширення у багатьох практичних застосуваннях [3]):

$$\bar{R}(t) = 0,5(-t(1-t)^2\bar{P}_0 + (2-5t^2+3t^3)\bar{P}_1 + t(1+4t-3t^2)\bar{P}_2 - t^2(1-t)\bar{P}_3).$$

Як випливає з розгляду рис. 1, сплайнова крива Catmull-Rom не заходить у зону, означену лоскості ої ламаною.

Оскільки при моделюванні сплайнових кривих Catmull-Rom на початковій і кінцевій ділянках додавалися точки, які збігалися з крайніми точками P_0 і P_3 , тобто ділянки $P_{-1}P_0$ і P_3P_4 мали нульову довжину, тому дотичні в цих точках відповідно збігаються зі сторонами P_0P_1 і P_3P_4 триланкової ламаної. Звідси й ділянки $P_{-1}P_0P_1P_2$ і $P_1P_2P_3P_4$ сплайнових кривих є дотичними до цих сторін, що в певній мірі погіршує загальне візуальне сприйняття складеної сплайнової кривої Catmull-Rom.

Для позбавлення виявлених недоліків сплайнових кривих Catmull-Rom пропонується визначати похідні в точках P_1 і P_2 із застосуванням коефіцієнта напруження m та відомих в обчислювальній математиці центральних різниць, які для координати x мають вигляд:

$$R'_x(s_i) = \frac{1}{H_i^{i+1}} \left(-\delta_{i+1}x_{i-1} + \frac{(\delta_{i+1}^2 - 1)}{\delta_{i+1}}x_i + \frac{1}{\delta_{i+1}}x_{i+1} \right),$$

де

$$\delta_{i+1} = \frac{h_{i+1}}{h_i}; \quad h_{i+1} = s_{i+1} - s_i; \quad h_i = s_i - s_{i-1};$$

$$H_i^{i+1} = h_i + h_{i+1}.$$

Аналогічним чином знаходиться похідна $R'_y(s_i)$. Слід зазначити, що при визначенні похідних під s_i розуміється довжина i -ої ланки. Діленням $R'_y(s_i)$ на $R'_x(s_i)$ отримуємо похідну dy/dx в необхідній точці, а далі кут нахилу в ній дотичної.

Для точки P_1 індекс i дорівнює одиниці, тому при розрахунку похідної будуть задіяні точки P_0 і P_2 . Для точки P_2 індекс i дорівнює двом і отже до при розрахунку похідної будуть задіяні точки P_1 і P_3 .

Треба зазначити, що вирази (2) і (3) в певній мірі можна також вважати центральними різницями, але які розраховані для точок, що рівномірно розташовані.

Підставивши значення похідних у кінцевих точках P_1 і P_2 , які отримані із застосуванням центральних різниць, до виразів (2) і (3), формуємо систему рівнянь, подібну (4). Розв'язавши цю систему матимемо коефіцієнти залежностей (1), які описуватимуть модифіковану сплайнову криву на ділянці між точками P_1 і P_2 .

Для прикінцевих ділянок пропонується визначати похідні в точках P_0 і P_3 із застосуванням лівих і правих різниць:

$$R'_x(s_i) = \frac{1}{H_i^{i+1}} \left(-(2 + \delta_{i+1})x_{i-1} + \frac{(1 + \delta_{i+1})^2}{\delta_{i+1}}x_i - \frac{1}{\delta_{i+1}}x_{i+1} \right);$$

$$R'_y(s_i) = \frac{1}{H_i^{i+1}} \left(\delta_{i+1}x_{i-1} + \frac{(1 + \delta_{i+1})^2}{\delta_{i+1}}x_i + \frac{(2 + \delta_{i+1})}{\delta_{i+1}}x_{i+1} \right).$$

При визначенні похідних із застосуванням лівих різниць будуть задіяні базові точки P_0, P_1 і P_2 , а при визначенні похідних із застосуванням правих різниць – точки P_2, P_3 і P_4 .

Залежності для визначення центральних, лівих і правих похідних отримані розкладанням на нерівномірній сітці функції, що диференціюється, в ряд Тейлора.

Змодельована за цих пропозицій крива показана на рис. 2. Модифікованій сплайновій кривій Catmull-Rom відповідає лінія, що має більшу товщину обведення. Тонкою лінією показана оригінальна сплайнова крива Catmull-Rom. У точках P_1 і P_2 проведені прямі, які є дотичними до побудованих сплайнових кривих. Відрізки прямих меншої довжини є повторенням відповідних

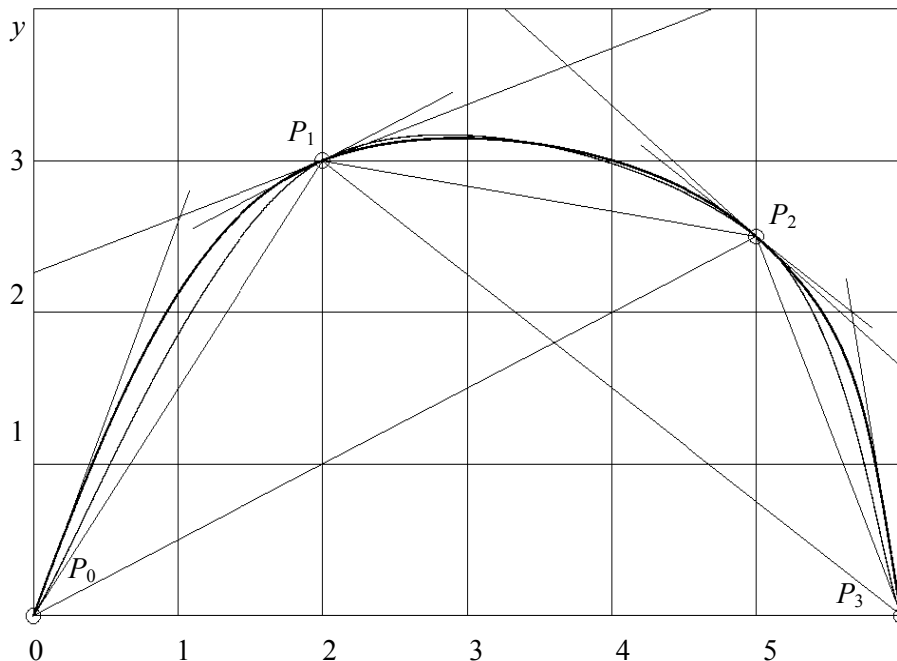


Рис. 2. Модифікована та оригінальна сплайнові криві Catmull-Rom

прямих, які можна побачити на рис. 1. Візуальною оцінкою розташування похідних можна прийти до висновку, що між кутами їх нахилу існує певна різниця, яка впливає на проходження згенерованої сплайнової кривої. Цю різницю на ділянці між точками P_1 і P_2 можна також оцінити візуально.

Зазначимо, що для модифікованих сплайнових кривих Catmull-Rom коефіцієнт напруження m має бути більшим за одиницю.

У цій роботі розглянуто побудову оригінальних і модифікованих сплайнових кривих Catmull-Rom на базі довільно обраної лоскості ої ламаної, але кількість вихідних точок може бути будь-якою. У цьому плані ніяких обмежень на побудову сплайнових кривих не існує. Для всіх проміжних точок, крім першої і останньої, похідні для модифікованих кривих визначаються із застосуванням центральних різниць. Похідні в початковій і кінцевій точках розраховуються із застосуванням лівих і правих різниць. При побудові замкнутої сплайнової кривої Catmull-Rom на підставі $(n+1)$ заданих точок приймається, що $\bar{P}_{-1} = \bar{P}_n$ і $\bar{P}_{n+2} = \bar{P}_0$.

Висновки. Модифікацією сплайнових кривих Catmull-Rom шляхом визначення похідних із застосуванням центральних, лівих і правих різниць можна дещо поліпшити форму результуючої кривої, особливо на початковій і кінцевій ділянках.

1. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование [Текст] / Н. Н. Голованов. – М.: Физматлит, 2002. – 472 с.
2. Михайленко В.Е. Геометрические моделирования и машинная графика в САПР [Текст] / [В.Е. Михайленко, В.Н. Кислоокый, А.А. Лященко и др.] – К.: Вища школа, 1991. – 374 с.
3. Поляков А.Ю. Методы и алгоритмы компьютерной графики в примерах на Visual C++ [Текст] / А.Ю. Поляков, В.А. Брусенцев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
4. Фокс А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве [Текст] / А. Фокс, М. Пратт. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
5. Шикин Е.В. Кривые на плоскости и в пространстве [Текст] / Е.В. Шикин, М.М. Каменецкий. – М.: Фазис, 1997. – 325 с.
6. Catmull E. A class of local interpolating splines [Text] / E. Catmull, R. Rom / Computer Aided Geometric Design, Academic Press, New York, 1974. – P. 317 – 326.
7. Farin G. Curves and surfaces for computer-aided geometric design [Text] / G. Farin. – Academic Press Inc., 1997. – [4-th edition]. – 447 p.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2015.

УДК 514.18

Бумага А.І.*Мелітопольська школа прикладної геометрії**Донбаська національна академія будівництва і архітектури***РОЗРАХУНКОВИЙ АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МЕЖИ МІЦНОСТІ ПРИ СТИСКАННІ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО ДЬОГТЕБЕТОНУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД 4-Х ПАРАМЕТРІВ**

В роботі запропоновано розрахунковий алгоритм залежності границі міцності при стисненні дрібнозернистого дьогтебетону від чотирьох параметрів: концентрації активатора поверхні мінерального порошку, концентрації відсіву полівінілхлориду, в'язкості дьогтю і температури.

Ключові слова: БН-числення, геометричне моделювання, асфальтобетон, дрібнозернистий дьогтебетон, границі міцності, розрахунковий алгоритм.

Форм. 4. Лит. 8.

А.И. Бумага**РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ДЕГТЕБЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ 4-Х ПАРАМЕТРОВ**

В работе предложен расчетный алгоритм зависимости предела прочности при сжатии мелкозернистого дегтебетона от четырех параметров: концентрации активатора поверхности минерального порошка, концентрации отсева поливинилхлорида, вязкости дегтя и температуры.

Ключевые слова: БН-исчисление, геометрическое моделирование, асфальтобетон, мелкозернистый дегтебетон, предел прочности, расчетный алгоритм.

A.I. Bumaga**CALCULATION ALGORITHM FOR DETERMINING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF FINE-GRAINED TARMACADAM DEPENDING ON 4 PARAMETERS**

The paper presents a calculation algorithm depends border compressive strength of fine-grained tarmacadam four parameters: the concentration of activator surface mineral powder, polyvinyl chloride concentrations dropout, viscosity and temperature tar.

Keywords: BN-calculation, geometric modeling, asphalt, fine-grained tarmacadam, boundary strength, calculation algorithm.

Постановка проблеми. З давніх часів людство намагалось описувати процеси та явища живої природи за допомогою аналітичних залежностей. Таким чином було знайдено багато фізичних законів. З ростом технологічних процесів з'явилась необхідність аналітичного опису не тільки природних явищ і процесів, але й штучних. Згодом наукова спільнота почала досліджувати об'єкти пізнання на їх моделях з метою отримання пояснень цих явищ і процесів, опису властивостей, а також для передбачення поведінки явищ і процесів, які цікавлять дослідника. На даний момент поняття моделі є багатозначним і залежить від багатьох факторів. В даний час за технологією моделювання та області застосування виділяють такі основні види моделювання: інформаційне моделювання, комп'ютерне моделювання, математичне моделювання, математичне моделювання соціально-історичних процесів, математико-картографічне моделювання, молекулярне моделювання, цифрове моделювання, логічне моделювання, педагогічне моделювання, психологічне моделювання, статистичне моделювання, структурне моделювання, фізичне моделювання, економіко-математичне моделювання, імітаційне моделювання, еволюційне моделювання, графічне і геометричне моделювання, натурне моделювання, метамоделювання.

Не винятком є і дослідження властивостей асфальтобетону в залежності від складу композиційного матеріалу. Проаналізувавши декілька дисертаційних робіт [1, 2, 3], пов'язаних з оптимізацією складів асфальтобетонів з різними в'язкими речовинами і мінеральним порошком, нами встановлено, що у всіх цих роботах була розроблена матриця планування для подальшого дослідження властивостей асфальтобетону за допомогою математичних моделей на основі регресійного аналізу. Але проведений автором у роботі [4] аналіз встановив, що такі математичні моделі не завжди відповідають потрібним критеріям адекватності, а іноді дають значну похибку у порівнянні із вихідними даними.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [4] автором було проаналізовано дисертаційні роботи [1, 2, 3] та показано, що регресійні моделі є недостатньо стійкими до зміни вихідної інформації і похибка може сягати майже 60% навіть при високих значеннях коефіцієнтів кореляції. В цій же роботі, за допомогою БН-числення [7-9], автором запропоновано спосіб геометричного

моделювання багатопараметричних явищ і процесів методом рухомого симплексу. Далі на основі запропонованого способу, в роботі [5] була розроблена геометрична модель залежності границі міцності при стисканні від чотирьох параметрів. Але у результаті отримано геометричну модель процесу у п'ятивимірному просторі, яку складно використовувати і досліджувати без допомоги ПЕОМ, а для використання ПЕОМ потрібно представити цю модель у вигляді розрахункового алгоритму.

Формулювання цілей статті. Розробити розрахунковий алгоритм, який дозволяє розрахувати межу міцності при стисканні дрібнозернистого дьогтебетону в залежності від концентрації активатора поверхні мінерального порошку, концентрації відсіву полівінілхлориду, в'язкості дьогтю і температури.

Основна частина. Розглянемо послідовність точкових рівнянь, які були отримані у [5] і складались із трьох етапів. На першому етапі було встановлено залежність границі міцності при стисненні з концентрацією активатора поверхні мінерального порошку і концентрацією відсіву полівінілхлориду при в'язкості дьогтю 52с і температурі 0°C. На другому етапі до попередніх двох параметрів (концентрація активатора поверхні мінерального порошку і концентрація відсіву полівінілхлориду) було додано третій – в'язкість дьогтю. На третьому етапі до попередніх трьох параметрів було додано четвертий – температуру дьогтебетону. На всіх цих етапах додаткові параметри були ув'язані між собою і узгоджені з загальною геометричною моделлю процесу за допомогою рівняння дуги параболи 2-го порядку, яка проходить через три наперед задані точки, що було розроблено автором у [6].

Слід зазначити, що запропонований вище розрахунковий алгоритм складається із точкових рівнянь, які, по суті, є символьним записом, а для переходу до системи параметричних рівнянь потрібно зробити покоординатний розрахунок точок. Але, як відомо, при паралельному проєкціюванні, якщо одна з трьох координат тривимірного простору дорівнює нулю, то отримуємо проєкцію геометричного об'єкту на одну із площин проєкцій, а якщо дві з трьох координат тривимірного простору дорівнюватимуть нулю, то отримуємо проєкцію – на одну з осей проєкцій прямокутної декартової системи координат. Узагальнюючи цю логічну послідовність, можна зробити висновок, що для визначення будь якої з характеристик процесу, використовуючи особливі рівняння БН-числення, достатньо зробити розрахунок лише по необхідній характеристиці, тобто по одній координаті багатовимірної системи координат. Наприклад, якщо потрібно межу міцності при стисканні R_0 дрібнозернистого дьогтебетону, то немає сенсу робити покоординатний розрахунок для всіх п'яти координат п'ятивимірного простору, до якого належить геометрична модель процесу, достатньо зробити розрахунок тільки по одній координаті, яка характеризує межу міцності при стисканні R_0 .

Враховуючи все вищесказане, отримуємо наступний розрахунковий алгоритм:

1. Визначимо 27 опорних дуг сегментів поверхонь. Для економії місця наведемо тільки перші 9 рівнянь опорних дуг, які відповідають межі міцності дьогтебетону при температурі 0°C. Інші 18 рівнянь будуть аналогічними тільки відповідатимуть межі міцності дьогтебетону при відповідно при 20°C і 50°C.

$$\left[\begin{array}{l} P_{52}^0 = A_1^{52}\bar{u}(1-2u) + 4A_2^{52}\bar{u}u + A_3^{52}u(2u-1), \\ Q_{52}^0 = B_1^{52}\bar{u}(1-2u) + 4B_2^{52}\bar{u}u + B_3^{52}u(2u-1), \\ R_{52}^0 = C_1^{52}\bar{u}(1-2u) + 4C_2^{52}\bar{u}u + C_3^{52}u(2u-1), \\ P_{130}^0 = A_1^{130}\bar{u}(1-2u) + 4A_2^{130}\bar{u}u + A_3^{130}u(2u-1), \\ Q_{130}^0 = B_1^{130}\bar{u}(1-2u) + 4B_2^{130}\bar{u}u + B_3^{130}u(2u-1), \\ R_{130}^0 = C_1^{130}\bar{u}(1-2u) + 4C_2^{130}\bar{u}u + C_3^{130}u(2u-1), \\ P_{208}^0 = A_1^{208}\bar{u}(1-2u) + 4A_2^{208}\bar{u}u + A_3^{208}u(2u-1), \\ Q_{208}^0 = B_1^{208}\bar{u}(1-2u) + 4B_2^{208}\bar{u}u + B_3^{208}u(2u-1), \\ R_{208}^0 = C_1^{208}\bar{u}(1-2u) + 4C_2^{208}\bar{u}u + C_3^{208}u(2u-1), \end{array} \right. \quad (1)$$

2. Визначимо 9 опорних дуг сегментів гіперповерхні, які водночас є твірними відповідних сегментів поверхні:

$$\left[\begin{array}{l} M_{52}^0 = P_{52}^0 \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{52}^0 \bar{v}v + R_{52}^0 v(2v - 1), \\ M_{130}^0 = P_{130}^0 \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{130}^0 \bar{v}v + R_{130}^0 v(2v - 1), \\ M_{208}^0 = P_{208}^0 \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{208}^0 \bar{v}v + R_{208}^0 v(2v - 1), \\ M_{52}^{20} = P_{52}^{20} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{52}^{20} \bar{v}v + R_{52}^{20} v(2v - 1), \\ M_{130}^{20} = P_{130}^{20} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{130}^{20} \bar{v}v + R_{130}^{20} v(2v - 1), \\ M_{208}^{20} = P_{208}^{20} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{208}^{20} \bar{v}v + R_{208}^{20} v(2v - 1), \\ M_{52}^{50} = P_{52}^{50} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{52}^{50} \bar{v}v + R_{52}^{50} v(2v - 1), \\ M_{130}^{50} = P_{130}^{50} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{130}^{50} \bar{v}v + R_{130}^{50} v(2v - 1), \\ M_{208}^{50} = P_{208}^{50} \bar{v} (1 - 2v) + 4Q_{208}^{50} \bar{v}v + R_{208}^{50} v(2v - 1). \end{array} \right. \quad (2)$$

3. Визначимо 3 опорні дуги сегменту гіперповерхні чотиривимірного простору:

$$\left[\begin{array}{l} N_0 = M_{52}^0 \bar{w} (1 - 2w) + 4M_{130}^0 \bar{w}w + M_{208}^0 w(2w - 1), \\ N_{20} = M_{52}^{20} \bar{w} (1 - 2w) + 4M_{130}^{20} \bar{w}w + M_{208}^{20} w(2w - 1), \\ N_{50} = M_{52}^{50} \bar{w} (1 - 2w) + 4M_{130}^{50} \bar{w}w + M_{208}^{50} w(2w - 1). \end{array} \right. \quad (3)$$

4. Визначимо твірну сегменту гіперповерхні, яка залежить від чотирьох параметрів u , v , w і t :

$$T = N_0 \bar{t} (1 - 2t) + 4N_{20} \bar{t}t + N_{50} t(2t - 1). \quad (4)$$

Таким чином, маємо розрахунковий алгоритм (у вигляді послідовностей точкових рівнянь) геометричної моделі залежності межі міцності при стисканні від концентрації активатора поверхні мінерального порошку, концентрації відсіву полівінілхлориду, в'язкості дьогтю і температури.

Слід відзначити, що у даному розрахунковому алгоритмі вихідними даними є значення A_i^j , B_i^j і C_i^j , які відповідатимуть значенню межі міцності при стисненні в залежності від чотирьох параметрів і були використані із таблиці 1 [4]. Також до вихідних даних належать значення параметрів u , v , w і t , які визначаються в межах від 0 до 1 і відповідають певним фізико-механічним характеристикам, від зміни яких напряму залежить межа міцності при стисканні, а отже і якість, дьогтебетону.

Як видно із послідовностей точкових рівнянь (1), (2), (3) і (4), всі трійки точок ув'язані за допомогою однотипного рівняння дуги параболи 2-го порядку, що полегшує програмування такого досить громіздкого розрахункового алгоритму. Нами була створена програмна реалізація запропонованої геометричної моделі у програмному пакеті *Maple* для розрахунку межі міцності при стисканні в залежності від чотирьох змінних параметрів. За результатами цих досліджень був отриманий акт впровадження у виробництво ТОВ ДАК «Автомобільні дороги України».

У якості приклада використання запропонованої моделі розв'яжемо наступну задачу: розрахувати межу міцності при стисканні R_0 дрібнозернистого дьогтебетону, якщо в'язкість дьогтю $C_{30}^{10} = 150$ с, концентрація відсіву полівінілхлориду $C_{mПВХ} = 1\%$, концентрація активатора поверхні мінерального порошку $C_{mKM-МГ} = 0,3\%$ і температура дьогтебетону $T = 35$ °С.

Розв'язок. З геометричного сенсу параметрів u , v , w і t , що входять до складу відповідних однотипних точкових рівнянь (1), (2) і (3), який було розглянуто у [6], видно, що відповідні параметри змінюються лінійно в межах $[0;1]$. Розглянемо по черзі їх відповідність до фізико-механічних параметрів дьогтебетону. Так параметру u прямо пропорційно відповідає концентрація активатора поверхні мінерального порошку $C_{mKM-МГ}$, яка також змінюється в межах $[0;1]$, отже $u = 0,3$. Аналогічно параметру v відповідає концентрація відсіву

полівінілхлориду $C_{mПВХ}$, яка змінюється в межах $[0,5; 2]$. Тобто значенню концентрації відсіву полівінілхлориду $C_{mПВХ} = 1\%$ відповідає значення параметра $\nu \approx 0,33$. Параметру w ставиться у відповідність в'язкість дьогтю C_{30}^{10} , яка змінюється в межах $[52; 208]$. Тоді в'язкості дьогтю $C_{30}^{10} = 150$ с відповідає значення параметра $w \approx 0,63$. І нарешті, параметру t відповідає температура дьогтебетону T , яка змінюється в межах $[0; 50]$. А отже значенню температури $T = 35$ °C відповідає значення параметру $t = 0,7$.

Підставивши отримані значення параметрів u , ν , w і t у програму, яка була створена автором у програмному пакеті *Maple*, отримаємо наступне значення межі міцності при стисканні $R_0 \approx 2,31$ МПа. Проаналізувавши вихідні дані, що наведені у таблиці 1 [4], можна зробити висновок про адекватність запропонованої геометричної моделі і, отриманого на її основі, розрахункового алгоритму.

Запропонований розрахунковий алгоритм геометричної моделі процесу залежності межі міцності при стисканні дрібнозернистого дьогтебетону від трьох параметрів є прикладом використання математичного апарату БН-числення [7-9] для моделювання багатопараметричних явищ і процесів. У даному випадку використовувались ті вихідні дані, які були отримані із практики проектування асфальтобетонів. Аналогічним чином кількість ув'язаних між собою параметрів може бути більшою, ніж чотири.

Висновки. Одержано, на базі БН-числення, розрахунковий алгоритм і наведено приклад його використання, який дозволяє розрахувати межі міцності при стисканні дрібнозернистого дьогтебетону в залежності від концентрації активатора поверхні мінерального порошку, концентрації відсіву полівінілхлориду, в'язкості дьогтю і температури, що дозволяє зменшити кількість необхідних і дорогих експериментів для аналітичного опису та дослідження властивостей асфальтобетонів в залежності від складу і кількості його компонентів.

1. Ходун В.Н. Дёгтебетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой: дис. ... кандидата технических наук: 05.23.05 / Ходун Владимир Николаевич. – Макеевка, 1999. – 146 с.
2. Рыбалко И.Ф. Минеральный порошок из шлама нейтрализации травильных растворов: дис...кандидата технических наук: 05.23.05 / Рыбалко Иван Федотович. – Макеевка, 1999. – 137 с.
3. Самойлова Е.Э. Дорожные асфальтобетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой с использованием реакционно-способного термопласта Элвалой АМ: дис. ... кандидата технических наук: 05.23.05/ Самойлова Елена Эдуардовна. – Макеевка, 2007. – 171 с.
4. Найдыш А.В. Теоретические основы геометрического моделирования физико-механических свойств асфальтобетонных методами БН-исчисления / Найдыш А.В., Конопацкий Е.В., Бумага А.И. // Научный вестник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Математика. Геометрія. Інформатика / гол. ред. кол. А.В. Найдыш. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Т.1. – С.111-117.
5. Бумага А.И. Геометрическое моделирование физико-механических свойств асфальтобетона / Бумага А.И., Найдыш А.В., Гавриленко Е.А // Вестник Херсонского национального технического университета. Вып.3(50). – Херсон: ХНТУ, 2014. – С.567-570.
6. Бумага А.И. Точковое рівняння дуги параболы другого порядка / Бумага А.И. // Міжвідомчий науково-технічний збірник. Прикладна геометрія та інженерна графіка (спецвипуск). Вип.90. – К.: КНУБА, 2012. – С. 49-52.
7. Найдыш В.М. Алгебра БН-исчисления / В.М. Найдыш, И. Г. Балюба, В. М. Верещага // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 90. – 2012. – С.210-215.
8. Балюба И.Г. Точечное исчисление геометрических форм и его место в ряду других существующих исчислений / И. Г. Балюба, Б. Ф. Горягин, Е.В. Конопацкий и другие // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Научный журнал №6. – 2011. – С. 24-29.
9. Балюба И.Г. Основы математического аппарата точкового числения / Балюба И.Г., Поліщук В.І., Малютіна Т.П. Праці // Таврійська державна агротехнічна академія. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Т. 29. – Мелітополь: ТДАТА, 2005.– С.22-30.

УДК 514.18:004.925.8

Г.І. Вірченко*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"***ДИНАМІЧНЕ ВАРІАНТНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЛІНІЙ, ПОВЕРХОНЬ І ТІЛ
МЕТОДОМ ПОЛІПАРАМЕТРИЗАЦІЇ**

У даній статті розглянуто питання варіантного геометричного моделювання ліній, поверхонь і тіл на засадах запропонованого методу поліпараметризації. Напрацьовану методику формоутворення проілюстровано належними прикладами та виконано їх аналіз. У роботі визначено перспективні напрями проведення подальших наукових досліджень та практичного впровадження отриманих результатів.

Ключові слова: геометричний об'єкт, динамічне варіантне формоутворення, комп'ютерне моделювання, метод поліпараметризації.

*Рис. 1. Літ. 6.***Г.И. Вирченко****ДИНАМИЧЕСКОЕ ВАРИАНТНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИНИЙ,
ПОВЕРХНОСТЕЙ И ТЕЛ МЕТОДОМ ПОЛИПАРАМЕТРИЗАЦИИ**

В данной статье рассмотрены вопросы вариантного геометрического моделирования линий, поверхностей и тел на основе предложенного метода полипараметризации. Разработанная методика формообразования проиллюстрирована соответствующими примерами, выполнен их анализ. Определены перспективные направления проведения дальнейших научных исследований и практического внедрения полученных результатов.

Ключевые слова: геометрический объект, динамическое вариантное формообразование, компьютерное моделирование, метод полипараметризации.

G. Virchenko**DYNAMIC FORMATION VARIANT LINES, SURFACE AND BODIES
BY POLIPARAMETRIZATSIYI**

The article discusses the questions of variant geometric modeling of lines, surfaces and solids on the basis of the proposed polyparameterization method. Its main provisions are described in previous publications of the author. This research is an extension of new scientific direction, developed by the school of applied geometry of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" for computer-aided design of complex industrial products. The proposed technique of forming illustrated with appropriate examples. Their detailed analysis was carried out. The paper identified promising areas for further research and practical implementation of the results. It concerns to complex optimization of designed technical objects and processes for their manufacture and use. The implementation can be made also in other areas, such as education, medicine and so on.

Keywords: computer modeling, dynamic variant shaping, geometric object, method of polyparameterization.

Постановка проблеми. Упродовж останніх років на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" напрацьовано новий науковий напрямок структурно-параметричного геометричного моделювання технічних об'єктів. Подальшим його розвитком є комп'ютерне динамічне варіантне формоутворення, яке в багатьох випадках спирається на відповідні побудови окремих ліній, поверхонь і тіл. Окреслена інтеграція обумовлює важливу науково-прикладну задачу щодо комплексної оптимізації всього життєвого циклу складної промислової продукції під час її автоматизованого проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання викладено в роботі [1]. Загальні питання його застосування як ефективного засобу для удосконалення процесів проектування та виготовлення об'єктів машинобудування подано у статті [2]. Належні конкретні приклади практичного використання наведено в публікації [3]. У дослідженні [4] визначено та систематизовано ряд способів динамічного варіантного формоутворення таких фігур як лінії, поверхні та тіла в рамках структурно-параметричного підходу.

Невирішені частини проблеми. У роботі [4] розглянуто кілька універсальних методик реалізації запропонованого методу поліпараметризації для динамічних варіантних побудов різноманітних геометричних об'єктів, однак лише в узагальненому вигляді, причому без наочних графічних ілюстрацій. Зазначені факти не сприяють широкому практичному впровадженню напрацьованих теоретичних результатів.

Постановка завдання. Головною метою даної статті є аналіз конкретних прикладів динамічного варіантного формоутворення ліній, поверхонь і тіл під час їх комп'ютерного моделювання за допомогою методу поліпараметризації.

Основний матеріал дослідження. Відомо, що лінії, поверхні та тіла у векторній параметричній формі можуть бути визначені відповідно як

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u), \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v), \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v, w), \quad (1)$$

де \mathbf{r} – радіус-вектор у деякій системі координат (декартовій, циліндричній, сферичній тощо); $u \in [u_{\min}, u_{\max}]$, $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$, $w \in [w_{\min}, w_{\max}]$ – параметри та проміжки їх змінювання.

У публікації [4] для систематизації способів динамічного варіантного формоутворення використано множину

$$C = B_1 \times B_2 \times B_3 = (C_i)_1^8, \quad (2)$$

яка є декартовим добутком його властивостей

$$B = (B_i)_1^3,$$

де B_1 =(неперервність), $B_1=(B_{11}, B_{12})$ =(формоутворення неперервне, формоутворення дискретне);

B_2 =(напряж), $B_2=(B_{21}, B_{22})$ =(однонаправлене, багатонаправлене);

B_3 =(характер ділянок параметризації), $B_3=(B_{31}, B_{32})$ =(сталі ділянки параметризації, змінні ділянки параметризації).

Розглянемо комп'ютерне моделювання ліній, поверхонь і тіл методом поліпараметризації на прикладі геометричних об'єктів, побудованих гвинтовим переміщенням певних фігур. Під останнім розумітимемо обертання навколо прямолінійної осі та одночасне паралельне перенесення вздовж неї. На рис. 1, *a* показано лінії, що визначаються точкою, яка рухається з радіусом обертання $R=1$ і кроком $P=2\pi$, тобто відповідним переміщенням уздовж осі за один повний оберт. Рівняння цих гвинтових ліній у прямокутній декартовій системі координат $Oxyz$ мають вигляд

$$\mathbf{r}(u) = (x, y, z) = (R \cos u, R \sin u, \frac{P}{2\pi} u), \quad (3)$$

де $u \in [0, 4\pi]$ – кут обертання навколо осі.

Примітка. На рис. 1 діапазони можливого варіювання геометричних об'єктів відтворені штриховими лініями, а частини зазначених об'єктів, що відповідають ділянкам параметризації – різним кольором.

На всіх зображеннях рис. 1, *a* наведено однонаправлене (від $u=0$ до $u=4\pi$) формоутворення. Для перших двох із них, які подають лінії в момент $u=2\pi$, виконано поділ проміжку змінювання параметра u на десять рівних частин. При цьому спочатку, згідно з кортежем (2), застосовано спосіб C_1 (формоутворення неперервне однонаправлене зі сталими ділянками параметризації), а потім – спосіб C_5 (формоутворення дискретне однонаправлене зі сталими ділянками параметризації), де для побудов використано ділянки через одну. Останнє зображення рис. 1, *a* ілюструє спосіб C_6 (формоутворення дискретне однонаправлене зі змінними ділянками параметризації), де для побудов застосовано дві ділянки з чотирьох, довжини яких поступово збільшуються у два рази.

На рис. 1, *б* показано динамічне комп'ютерне моделювання поверхонь. Перша та третя ілюстрації узагальнюють відповідні випадки попереднього рисунка за рахунок додаткового параметра v у виразі (3)

$$\mathbf{r}(u, v) = (x, y, z) = (R \cos u, R \sin u, \frac{P}{2\pi} u + v), \quad (4)$$

де $v \in [-1, 1]$ – визначає для створюваної фігури вздовж осі z потрібну висоту, яка не повинна перевищувати крок P .

Рівняння (4) є дефініцією гвинтової стрічки. За даною залежністю отримано і проміжне зображення рис. 1, б на десяти однакових ділянках параметризації, що подане в момент використання чотирьох із них у спосіб S_3 (формування неперервне багатонаправлене зі сталими ділянками параметризації). При цьому побудови йдуть по чергові з кінців $u=0$ та $u=4\pi$ в напрямку до середини опрацьовуваного геометричного об'єкта.

Шляхом подальших удосконалень одержуємо

$$\mathbf{r}(u, v, w) = (x, y, z) = ((R - v \cos w) \cos u, (R - v \cos w) \sin u, \frac{P}{2\pi} u - v \sin w), \quad (5)$$

де $v \in [0, 1]$ – радіус круга, який рухається вздовж гвинтової лінії; $w \in [0, 2\pi]$ – кут повороту радіуса, що утворює зазначений круг.

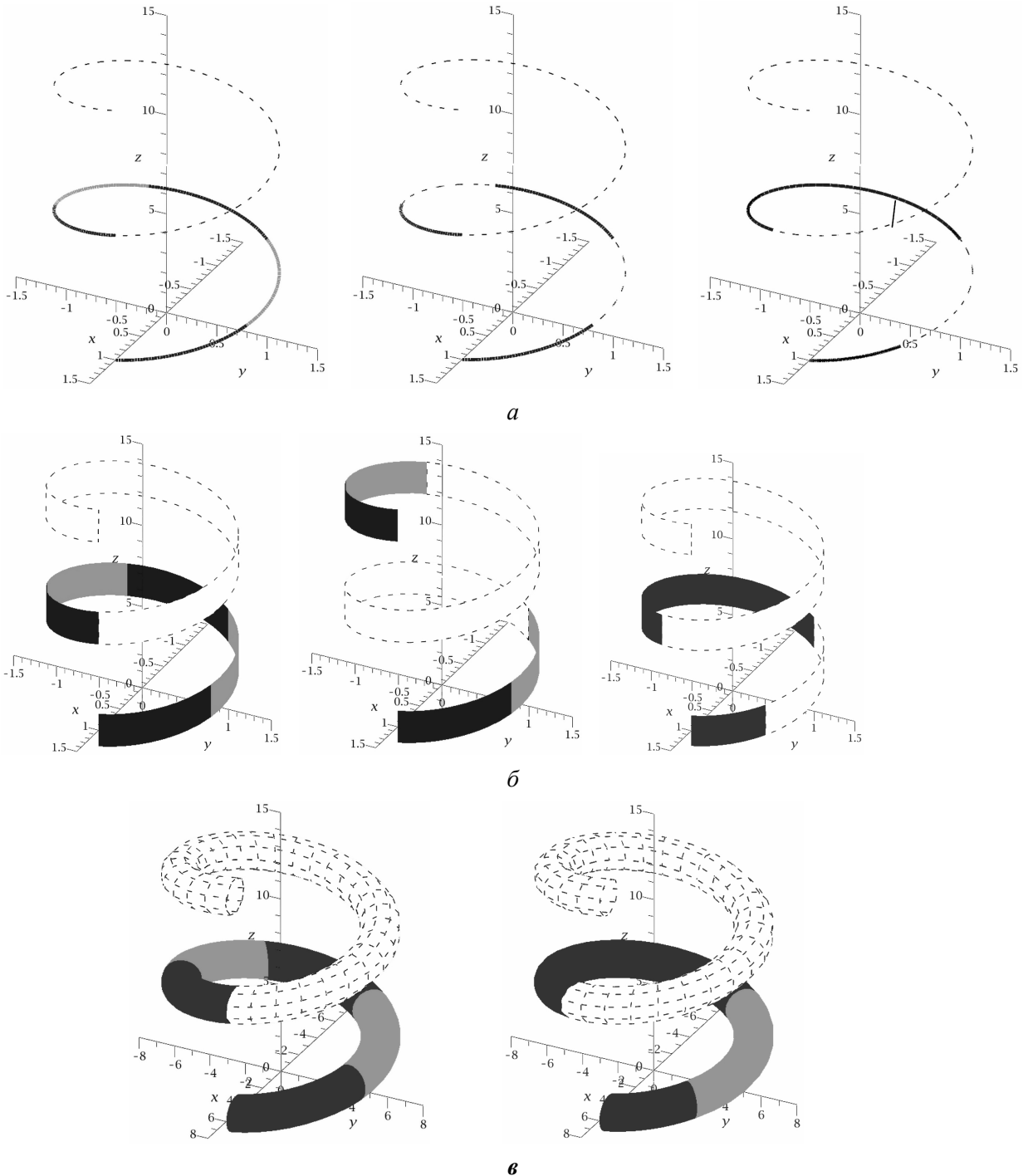


Рис. 1. Приклади динамічного варіантного формування:
а – ліній; б – поверхонь; в – тіл

На підставі співвідношення (5) виконано побудови рис. 1, в, на якому перше зображення узагальнює початкові ілюстрації рис. 1, а та рис. 1, б до тривимірної фігури., а друге спирається на останні зображення попередніх рисунків, але, на відміну від них, є не дискретним, а неперервним, тобто відноситься до способу C_2 (формування неперервне однонаправлене зі змінними ділянками параметризації).

Зауважимо, що для динамічного моделювання тіл на рис. 1, в застосовано радіус обертання $R=5$. Різні потрібні варіанти досліджуваних геометричних об'єктів на основі гвинтової лінії визначаються, зокрема, варіюванням кроку P , як рівномірного, так і ні. Це стосується й радіуса R , що може бути сталим та змінюватися згідно з певною залежністю, наприклад, лінійною від координати z . В останньому випадку отримаємо базову конічну гвинтову лінію.

Також для забезпечення більш широкого розмаїття опрацьовуваних об'єктів варто використовувати складніші та гнучкіші, ніж розглянуто, твірні фігури для побудови поверхонь і тіл. У наведених ілюстраціях під час варіантного комп'ютерного динамічного формування поверхонь це можуть бути не тільки відрізки прямих, а й дуги кіл, еліпси, параболи, гіперболи, криві вищих порядків, сплайни і т. д.; у випадку відповідного моделювання тіл – не лише круги, а і всілякі плоскі багатокутники, інші обмежені гладкими контурами поверхні, їх комбінації тощо. Так, зокрема, застосування додатного початкового значення у проміжку змінювання радіуса v круга виразу (5) призводить до одержання трубочастого тіла.

Отже, викладеними вище матеріалами доволі докладно, всебічно та системно розглянуто в належному аспекті автоматизовану побудову обраної групи досліджуваних одно-, дво- та тривимірних геометричних фігур, що дозволило успішно виконати поставлене науково-прикладне завдання.

Висновки. У даній статті проаналізовано динамічне варіантне формування ліній, поверхонь і тіл під час їх комп'ютерного моделювання за допомогою методу поліпараметризації на прикладі геометричних об'єктів, побудованих гвинтовим переміщенням. Подібним чином можуть розроблятися й інші різноманітні фігури, що забезпечується універсальним характером запропонованої методики та простотою її обчислювальної програмної реалізації.

Перспективи подальших досліджень полягають як у плані теоретичного розвитку напрацьованих підходів, наприклад, шляхом широкого використання графів, методів математичної оптимізації тощо, так і впровадження отриманих результатів у виробничу практику, освіту та інші галузі життєдіяльності людини. Наприклад, це стосується візуалізації певних процесів [5, 6], їх комплексної оптимізації, створення відповідного спеціалізованого комп'ютерного програмного забезпечення і т. д.

1. Ванін В.В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. праць. – Вип. 23. – Харків: ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.
2. Ванін В.В. Комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання як основа для комплексної оптимізації процесів проектування та виробництва об'єктів машинобудування / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко, Г.П. Грязнова. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Технологии машиностроения. – 5/1 (47), 2010. – С. 54-57.
3. Ванін В.В. Комп'ютерні структурно-параметричні геометричні моделі як засоби конструкторсько-технологічної оптимізації літака / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко, О.В. Збруцький // Механіка гіроскопічних систем: наук.-тех. зб. – Вип. 27. – К.: НТУУ "КПІ", 2014. – С. 111-119.
4. Ванін В.В. Варіантне моделювання геометричних об'єктів методом поліпараметризації / В.В. Ванін, Г.І. Вірченко, С.Г. Вірченко // Проблеми інформаційних технологій: наук. журнал. – №02(016). – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 76-79.
5. Ванін В.В. Структурно-параметричні геометричні моделі як засіб інтеграції авто-матизованого проектування сучасного літака / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Вісник Херсонського національного технічного університету: наук. журнал. – Вип. 3 (50). – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 571-574.
6. Вірченко Г.А. Використання структурно-параметричного підходу для комп'ютерної візуалізації багатовимірних геометричних об'єктів / Г.А. Вірченко // Технічна естетика і дизайн: наук.-тех. зб. – Вип. 7. – К.: Віпол, 2010. – С. 68-73.

УДК 004.422.8:621.01

В.В. Влах

Українська академія друкарства

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ПОЛІГРАФІЧНИХ ТА ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН В СПЕЦІАЛІЗОВАНІЙ СИСТЕМІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Автором даної статті було створено систему автоматизованого проектування механізмів. Перша версія програми дозволяє візуально сформувати кінематичну схему досліджуваного механізму, переглянути анімацію руху, провести кінематичний аналіз та отримати 3D-модель, яку можна застосувати у інших більш потужних системах. Програму можна застосовувати у навчальному процесі. В даній статті розглянуто можливості пропонованої САПР на прикладі аналізу механізмів поліграфічних та пакувальних машин.

Ключові слова: САПР, механізм, кінематика, 3D-модель, візуалізація.

Рис. 6. Літ. 9.

В.В. Влах**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ И УПАКОВОЧНЫХ МАШИН В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Автором данной статьи была создана система автоматизированного проектирования механизмов. Первая версия программы позволяет визуально сформировать кинематическую схему исследуемого механизма, просмотреть анимацию движения, провести кинематический анализ и получить 3D-модель, которую можно применить в других более мощных системах. Программу можно применять в учебном процессе. В данной статье рассмотрены возможности предлагаемой САПР на примере анализа механизмов полиграфических и упаковочных машин.

Ключевые слова: САПР, механизм, кинематика, 3D-модель, визуализация.

V.V. Vlakh**RESEARCH MECHANISMS OF PRINTING AND PACKING MACHINES IN SPECIALIZED COMPUTER AIDED DESIGN**

The author of this article was created computer-aided design of mechanisms. The first version of the program allows you to visually create a kinematic scheme of the test mechanism, see an animation of the motion, to conduct kinematic analysis and to take 3D-model that can be applied to other, more powerful systems. The program can be used in the educational process. This article describes the possibilities offered by this CAD on example analysis of mechanisms of printing and packaging machines.

Keywords: CAD, mechanism, kinematics, 3D-model, visualization.

В теперішній час проектування механізмів поліграфічних та пакувальних машин відбувається тільки з застосуванням інформаційних технологій. Процес проектування – це процес обробки і переробки інформації, в результаті якого отримується повне уявлення про об'єкт, що проектується і способи його виготовлення. Невід'ємним інструментом для проектування механізмів є система автоматизованого проектування (САПР). САПР - програмний пакет, призначений для створення креслень, конструкторської та/або технологічної документації та/або 3D моделей.

Проаналізувавши матеріали, які розміщені в мережі Internet, можна зробити висновок, що на даний момент існує багато програмного забезпечення, яке дозволяє проводити кінематичний аналіз, будь яких механізмів. Є велика кількість пакетів САПР різного рівня. До найбільш уживаних в Україні професійних програмних модулів, які дозволяють проводити кінематичний та динамічний аналіз, можна віднести програму КОМПАС, яка має бібліотеку анімації, модуль DynamicSimulation, який підключається до програми AutodeskInventor, модуль CosmosMotion програми SolidWorks, пакет розширення Simulink системи Matlab, програма T-Flex CAD 3D тощо. Ці програми дорогі, складні в засвоєнні та потребують великих апаратних ресурсів. Вартість усіх САПР співвідносяться за рівнями наступним чином [8]:

- Нижній: \$ 500- \$ 2000 за робоче місце (AutoCAD, AutoCAD LT, Компас);
- Середній: \$ 2000- \$ 20000 (Inventor, MechanicalDesktop, SolidWorks);
- Верхній: більше \$ 20000 (ProEngineer, Unigraphics).

Можна стверджувати, що сьогодні існує багато видів САПР, які дозволяють проводити кінематичний та динамічний аналіз механізмів. Це переважно великі потужні системи, які дорого коштують, складні в користуванні, потребують додаткових знань та великих апаратних ресурсів робочого комп'ютера. Лідер розробки таких систем Autodesk розробив безкоштовний мобільний

додаток ForceEffectMotion, який може бути корисним для студентів машинобудівних спеціальностей. В країнах СНД над вирішенням проблеми автоматизації розрахунку механізмів займались в 2000-х роках, але великих результатів досягнуто не було. Тому через малу платоспроможність більшість вітчизняних вчених та інженерів використовують для розрахунків універсальні програми такі як Excel. У Європі та США також займались над вирішенням даного питання. Створити програмний інструмент вузької спеціалізації не вдалось, але було розроблено багато рішень, які можна інтегрувати в потужні системи для удосконалення проектування.

Актуальність роботи. Згадані програмні продукти дорогі та потребують великих апаратних ресурсів. Також вони складні в засвоєнні і потребують додаткових знань для роботи з ними. Тому розроблення недорого, простого в використанні програмного забезпечення для дослідження та візуалізації механізмів є актуальним.

Метою роботи є розроблення САПР для конструювання, аналізу, синтезу і візуалізації важільних та кулачкових механізмів. Досліджувані за допомогою запропонованої програми механізми можна застосовувати у поліграфічних, пакувальних та інших машинах. Також програма буде корисною у навчальному процесі для демонстрації механізмів на лекційних та практичних заняттях (вивчення структури механізмів, перегляд анімації руху тощо).

Програма створювалась в середовищі Embarcadero RAD Studio XE5 на основі VCL, об'єктно-орієнтованого програмування [1] та MVC.VCL - бібліотека базових класів, створена для розробників програмного забезпечення під Windows. MVC - ModelViewController дає змогу відділити частину програми, яка відповідає за розрахунки від візуальної частини програми.

За допомогою методів об'єктно-орієнтованого програмування програма створена на основі об'єктів. Серед всіх механізмів поліграфічних і пакувальних машин близько 80% - це механізми II класу. Тому в даній програмі механізми класифікуються за Ассуром. Кожна група Ассура, кінематична пара, ланка – це об'єкти, які зберігають в собі величини кінематичних характеристик для подальшого розрахунку механізму [2]. Робота програми на основі створення об'єктів полегшує запис та зчитування даних досліджуваного механізму та дає змогу об'єктам обмінюватися даними. Такий метод програмування дає можливість маніпулювати параметрами механізму, змінюючи його властивості, і удосконалювати програму, дописуючи додаткові функції та властивості об'єктів.

Розроблювана програма дозволяє проводити розрахунок таких механізмів поліграфічних та пакувальних машин [7]:

- самонаклади аркушевих та зошитових напівфабрикатів (розгортки паковань);
- механізми штанцювально-висікальних пресів;
- приводи переміщень аркушів з розгортками паковань у штанцювально-висікальних пресах;
- приводи механізмів періодичного повороту стола з інструментами або затискачами (блокообробні агрегати, заклеювальні, верстати для виготовлення стаканів);
- механізми лінійного переміщення інструментів, ножеві різальні машини та інші.

Великим плюсом цього програмного забезпечення є наявність в ньому дерева побудови механізму, яке розташоване в правому верхньому куті головного вікна. В дереві відображається перелік об'єктів з яких складається досліджуваний механізм. Користувач має змогу редагувати потрібний йому об'єкт, змінювати величини параметрів та додавати до нього додаткові кінематичні пари та ланки, властивості яких також можна змінювати як окремі об'єкти.

Можливості програми:

- створення механізму довільної структури;
- перегляд кінематичних характеристик у вигляді графіків і таблиць для усіх положень;
- можливість збереження графіків, як растрового зображення, та виведення їх на друк;
- експорт даних у Word та Excel;
- перегляд анімації руху механізму;
- редагування параметрів вже створеного механізму;
- збереження структурної схеми механізму в форматах *.JPEG, *.BMP, *.PNG, *.TIF, *.WMF;
- експорт кінематичної схеми в AutoCAD та збереження документу в форматі *.DWG;
- формування коду програми (для побудови 3D-моделі) мовою AutoLisp та збереження в файл *.LSP;
- збереження 3D-моделі в форматах *.DWG та *.DWF;
- перегляд додаткової інформації по кінематичному та кінетостатичному аналізу.

Огляд програми буде відбуватись на прикладі аналізу механізмів поліграфічних та пакувальних машин. Програма дає змогу розрахувати механізм фальцювальних ножів[9] (рис. 1). Це кривошипно-коромисловий механізм, який застосовується в фальцювальних апаратах машин із шириною задрукуваної стрічки до 600 мм. і механічних швидкостей до 20000 об/год. Більш складнішим є механізм приводу штанцювального пресу [5] (рис. 2). Він складається з приводу 1, який приводить в рух натискну плиту (НП) через важільний розклинювальний механізм 2. Прес штанцювального автомата працює таким чином. У початковому положенні натискна плита розташована у крайньому положенні. Внаслідок обертання приводного валашатуни зміщуються ліворуч та праворуч. Такий симетричний рух шатунів через коромисла забезпечує строге вертикальне переміщення натискної плити до плоскої штанцювальної форми.

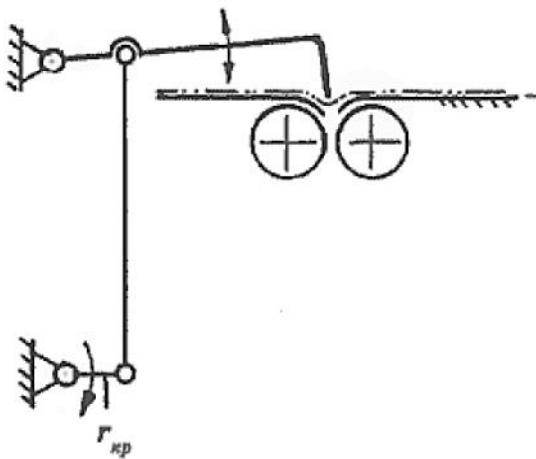


Рис. 1. Схема механізму фальцювальних ножів

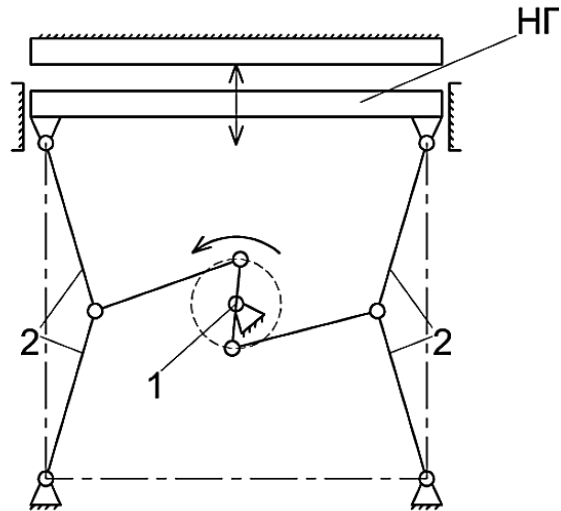


Рис. 2. Схема механізму приводу штанцювального пресу

На рисунку 3 зображено робоче вікно програми, в якому сформовано кінематичну схему механізму фальцювальних ножів з довільними розмірами ланок.

Для зручності аналізу та розрахунку в програмі можна візуально переглядати розміри ланок та їхні кути нахилу, напрямок швидкостей та прискорень ланок, вектори напрямку швидкостей та прискорень кінематичних пар, траєкторії руху точок тощо. На рисунку 4 можна побачити дослідження механізму приводу штанцювального пресу (величини довжин ланок задані довільно).

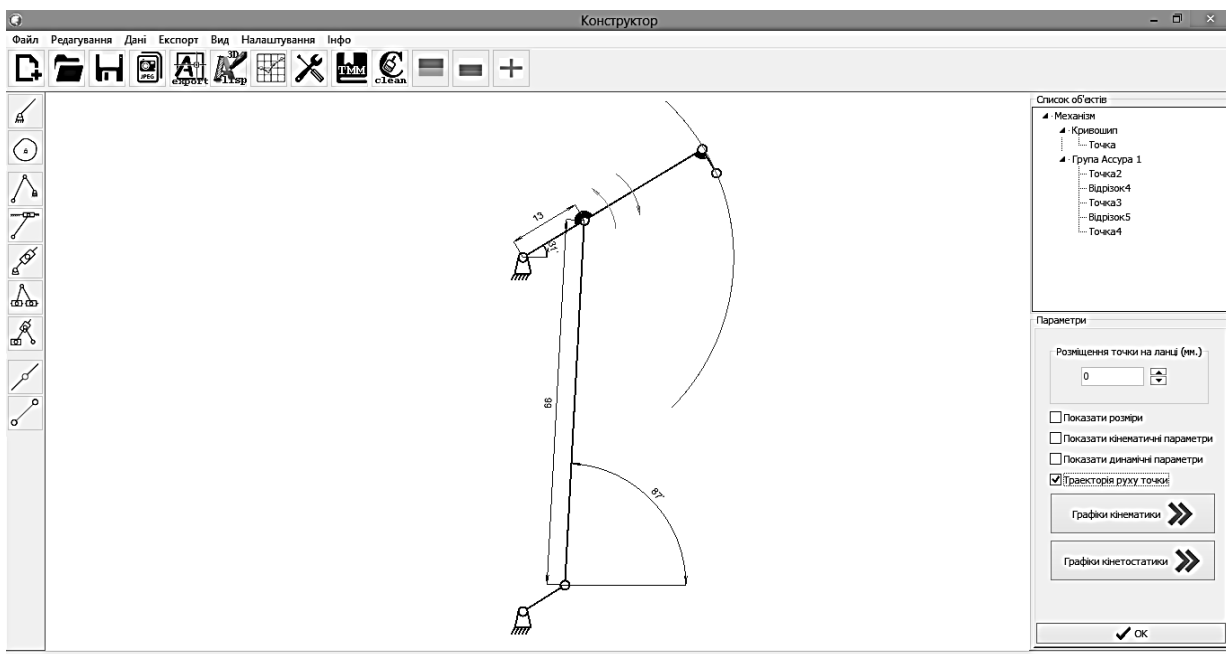


Рис. 3. Дослідження механізму фальцювальних ножів

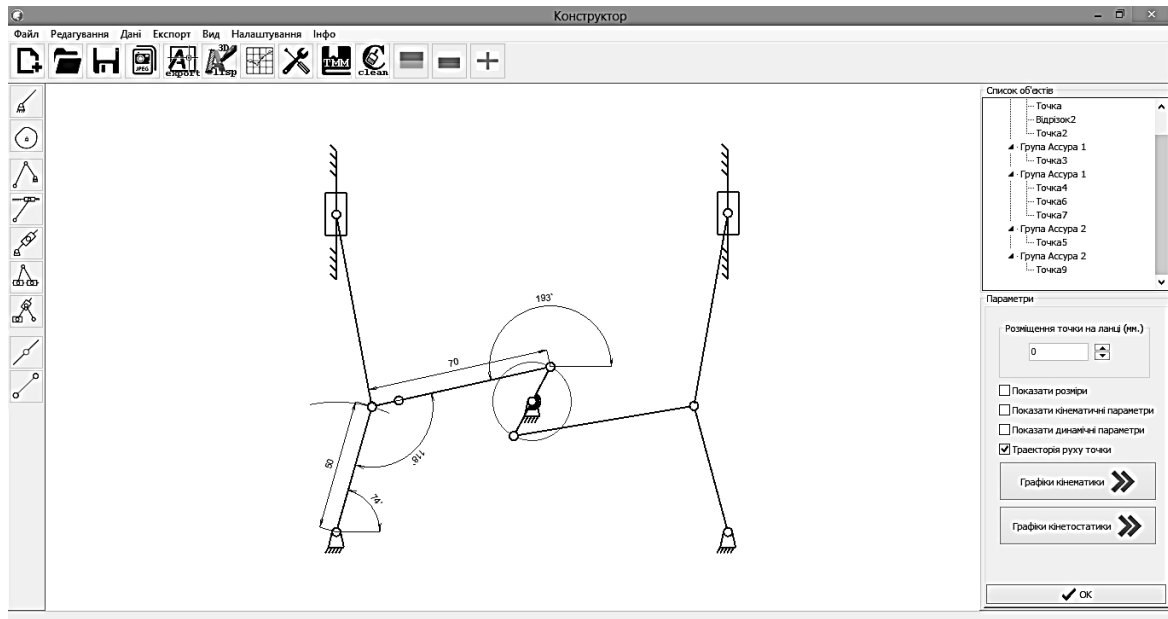


Рис. 4. Дослідження приводу механізму штанцювального пресу

Ще однією особливістю програми є можливість дослідження кулачкових механізмів або механізмів зі змінною довжиною ведучої ланки (кривошипа). На рисунку 5 показано механізм довільної структури, в якому привідна ланка змінює свою довжину на протязі всього циклу.

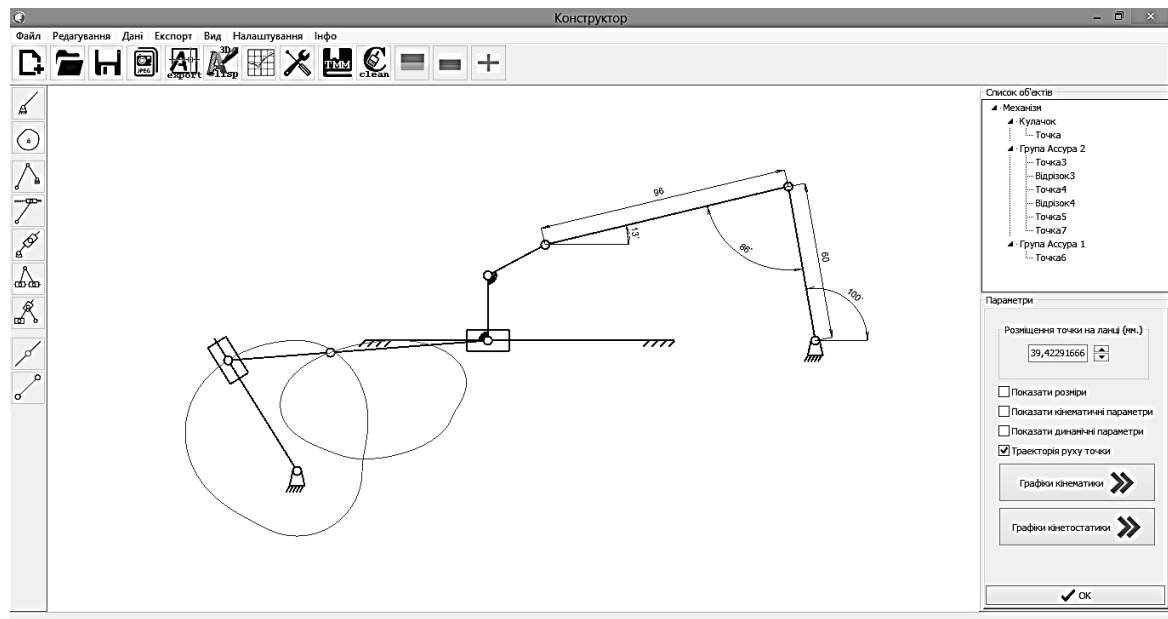


Рис. 5. Дослідження механізму довільної структури

Кінематичний розрахунок механізму базується на аналітичних залежностях отриманих у [3,4]. Результати обчислень можна переглядати у вигляді графіків та таблиць і записувати їх у текстовий файл. Для цього передбачені окремі вікна. Графіки зміни величин параметрів механізму можна дивитись в окремому вікні, зберігати в графічний файл та друкувати.

На прикладі механізму коливального конвеєра на рисунку 6 показано приклад отриманої об'ємної моделі досліджуваного механізму. Спочатку система автоматично формує код, який описує тривимірну модель досліджуваного механізму мовою AutoLISP для середовища AutoCAD [6]. Код програми відображається в окремому вікні, його можна відредагувати та зберегти в форматі *.lsp. З цього самого вікна можна відкрити AutoCAD (якщо встановлений), він автоматично, без втручання користувача побудує 3D-модель механізму. Така реалізація даної можливості дає змогу відредагувати параметри 3D-моделі механізму змінивши код LISP-програми та сформувати саме таку модель механізму, яку потрібно.

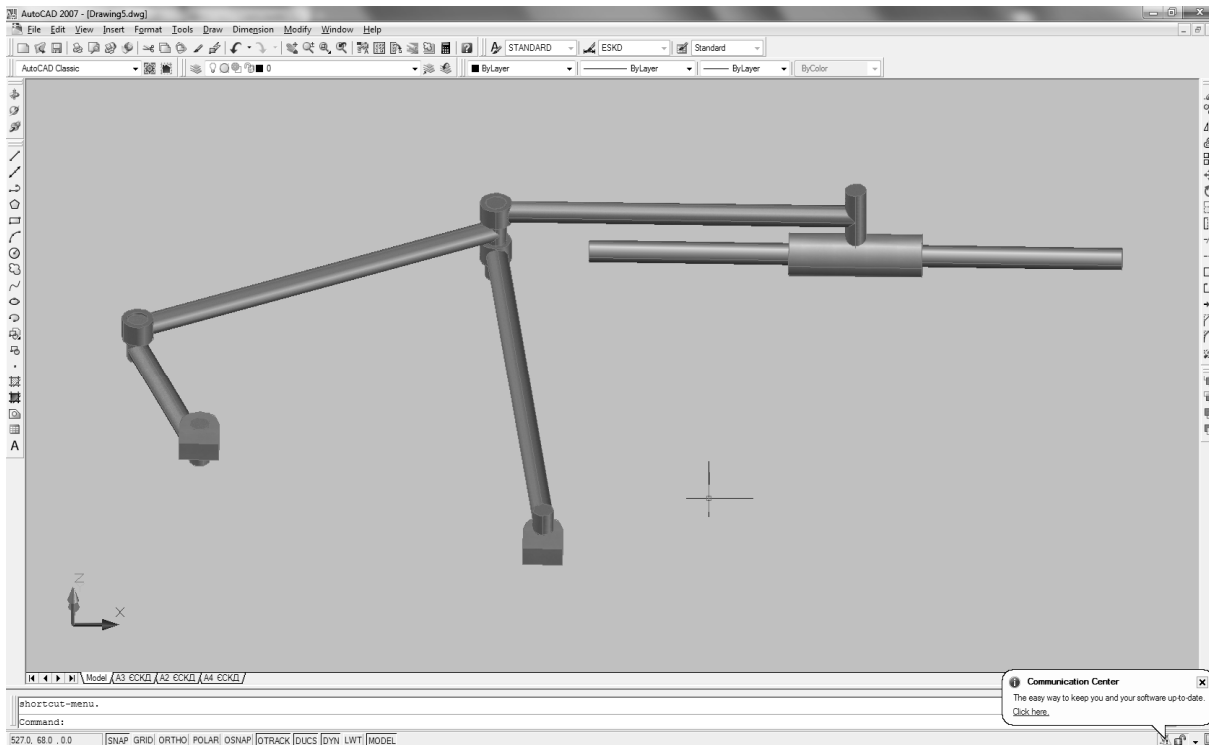


Рис. 6.3D-модель коливального конвеєра в середовищі AutoCAD

Висновок. Дана версія програми обчислює величини кінематичних характеристик механізмів II класу, що дає змогу проаналізувати кінематику механізму і отримати дані для подальшого динамічного синтезу та аналізу. Для поглибленого дослідження механізму, передбачено експорт даних (в форматі *.docx, *.xlsx, *.dwg, *.lsp) та автоматичне формування коду опису тривимірної моделі для AutoCAD. Програма буде корисною при розрахунках механізмів як інженерам, так і аспірантам, магістрантам і студентам машинобудівних спеціальностей. Враховуючи досить високі можливості візуалізації механізмів даного програмного забезпечення, його можна буде застосовувати в навчальному процесі на лекційних та практичних заняттях.

В майбутньому програма буде розширюватись та удосконалюватись. Планується розроблення нових можливостей системи: динамічний синтез та аналіз і формування коду програми (CNC-програми) для фрезерних станків з ЧПУ для виготовлення кулачків.

1. Архангельський А.Я. Программирование в Delphi для Windows / А.Я. Архангельський // Верс. 2006, 2007, TurboDelphi – СПб.: Бином-Пресс, 2007. – 1248 с.
2. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин: Підручник / Я.Т. Кіницький. К. : Наукова думка. – 2002. – 660 с.
3. Пасіка В.Р. Кінематика важільних механізмів з групами Ассура I і II видів / В.Р. Пасіка // Наукові записки. – 2001. – Вип. 3. – С. 12-16.
4. Пасіка В.Р. Кінематика важільних механізмів з групами Ассура III і V видів / В.Р. Пасіка // Поліграфія і видавнича справа. – 2001. – №37. – С.50-66.
5. Регей І.І. Споживче картонне пакування : Матеріали, проектування, обладнання для виготовлення. — Л.: УАД, 2011. — 142 с.
6. СергейЗуев, НиколайПолюшук. САПР на базеAutoCAD - какэтоделается / БХВ-Петербург. 2004. – 1168с.
7. Хведчин Ю. Й. Брошурувально-палітурне устаткування : Ч. 2: Палітурне устаткування: Підруч. / Ю.Й. Хведчин – Львів: УАД, – 2007. – 392 с.
8. Центр измерительныхтехнологий и промышленнойавтоматизации МГУ: (Классификация систем САПР) [електронний ресурс] – доступу URL: <http://www.automationlabs.ru/index.php/sw/135-2008-06-24-22-10-27>.
9. Чехман. Я. І. Друкарське устаткування: Підручник/Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів: УАД, 2005 – 468 с.

УДК 514:18

Є.А. Гавриленко, Ю.В. Холодняк, В.В. Кучеренко, А.О. Бездітний
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМОТВОРЕННЯ ТА ОБРОБКИ ДИНАМІЧНИХ
ПОВЕРХОНЬ

У статті запропоновано методику формування геометричної моделі поверхонь, заданих упорядкованим масивом точок та умовами, що на неї накладаються. Характеристики сформованих поверхонь забезпечують ламінарний характер обтікання їх середовищем (рідиною, газом, сипучими матеріалами).

Ключові слова: динамічна поверхня, каркас поверхні, лінійний елемент моделі, дискретно представлена крива, закономірна зміна диференціально-геометричних характеристик.

Е.А. Гавриленко, Ю.В. Холодняк, В.В. Кучеренко, А.А. Бездітний
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье предлагается методика формирования геометрической модели поверхностей, заданных упорядоченным массивом точек и условиями, которые на нее накладываются. Характеристики сформированных поверхностей обеспечивают ламинарный характер обтекания их средой (жидкостью, газом, сыпучими материалами).

Ключевые слова: динамическая поверхность, каркас поверхности, линейный элемент модели, дискретно представленная кривая, закономерное изменение дифференциально-геометрических характеристик.

Eu.A. Gavrilenko, Yu.V. Kholodnyak, V.V. Kycherenko, A.O. Bezditnyi
DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR SHAPING AND PROCESSING OF
DYNAMIC SURFACES

The method of forming of geometrical model of surfaces which are defined in an orderly array of points and conditions that are imposed on it is considered in this article. Characteristics of formed surfaces provide a laminar medium motion (liquid, gas, bulk materials) along them.

Keywords: dynamic surface, frame of surface, linear element of model, discretely represented curve, regular change of curvature and torsion.

Постановка проблеми. Модели складних поверхностей, як правило, формуються на основі дискретного лінійчатого каркаса. Геометричні властивості поверхності визначаються властивостями кривих, які є елементами каркаса. Лінійні елементи моделі поверхності, заданої упорядкованим масивом точок, формуються на основі дискретно представлених кривих (ДПК), заданих вихідним точковим рядом і характеристиками, які забезпечуються в процесі моделювання. В результаті моделювання отримуємо ДПК, кількість вузлів якої і характеристики, призначені в цих вузлах, забезпечують задані властивості неперервного обводу, який інтерполює точковий ряд, задаючий криву. При моделюванні динамічних поверхностей, функціональне призначення яких – взаємодія з середою, лінійні елементи моделі формуються виходячи з умов [8]: другої порядку гладкості, закономірне змінення диференціально-геометричних характеристик вздовж обводу (монотонне змінення кривизни і кручення вздовж ділянок обводу, на яких це можливо забезпечити).

Существующие методы формирования кривой, интерполирующей точечный ряд, (метод кусочно-гладких приближений, кривых Безье, В-сплайнов) при обеспечении заданного порядка гладкости не обеспечивают закономерное изменение кривизны и кручения вдоль обвода. Таким образом, разработка способа, позволяющего формировать ДПК и интерполировать ее узлы с помощью неперервного обвода, вдоль которого значения дифференциально-геометрических характеристик изменяются закономерно, является актуальной задачей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи формування плоских і просторових ДПК з закономірним зміненням диференціально-геометричних характеристик на основі довільного точкового ряду запропоновані в роботах [3, 4, 10]. Результатом моделювання є нова ДПК, що складається з скільки бажано великої кількості точок. Крива формується по окремих ділянках, на яких можливо забезпечити монотонний характер змінення кривизни і кручення. В вузлах ДПК призначаються такі положення дотичних, значень радіусів кривизни і кручення, які дозволяють на основі вихідного точкового ряду сформувати монотонну криву. На кожній ділянці, обмеженій послідовними точками, визначається область, всередині якої розташовані всі криві

линии, отвечающие условиям задачи. Область определяется исходя из условий, накладываемых на обвод: второй порядок гладкости монотонное изменение кривизны и кручения вдоль обвода. Точки сгущения назначаются внутри полученной области. ДПК считается сформированной в случае, когда область возможного расположения кривой, характеристики которой отвечают условиям задачи, не превышает заданной величины (точности дискретной интерполяции). После этого обвод может быть сформирован участками непрерывных кривых: сопровождающей ломаной линией, коробовой линией окружностей, обводом из дуг кривых Безье, B-сплайном.

В работе [5] представлен принцип работы и основные возможности программного обеспечения, которое позволяет, исходя из требований, предъявляемых к формируемой кривой, рассчитать координаты сколь угодно большого числа узлов, составляющих сформированную ДПК, и значения геометрических характеристик кривой в этих узлах.

Нерешенные части проблемы. Задачу изготовления изделий, ограниченных сложными поверхностями, с высокой точностью решают технологии, предполагающие обработку поверхности на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Обязательным этапом такой технологии является создание трехмерной компьютерной модели изделия с использованием САД-пакетов [6]. Линейными элементами модели поверхности являются непрерывные кривые линии. Таким образом, возникает необходимость создания методики, позволяющей в автоматическом режиме формировать обвод, который интерполирует точечный ряд, задающий кривую с закономерным изменением дифференциально-геометрических характеристик.

Целью исследований является разработка методики формирования компьютерных моделей и управляющих программ для обработки на станках ЧПУ поверхностей, заданных упорядоченным массивом точек и условиями, которые на них накладываются.

Основные результаты исследований. Предлагаемая методика создания компьютерной модели поверхности, заданной упорядоченным массивом точек, включает в себя следующие этапы.

1. Исходный массив точек разбивается на точечные ряды, задающие плоские или пространственные ДПК. На основе полученных точечных рядов формируются линейные элементы каркаса поверхности.

2. С помощью программного обеспечения, разработанного в системе компьютерной алгебры Maple, на основе полученных точечных рядов формируются ДПК, которые с заданной точностью задают непрерывный обвод, вдоль которого значения кривизны и кручения изменяются монотонно. Полученные в результате моделирования ДПК заданы координатами принадлежащих им точек и дифференциально-геометрическими характеристиками в этих точках. Рассчитанные данные в автоматическом режиме записываются в текстовый документ с расширением *.txt.

3. В системе трехмерного параметрического моделирования SolidWorks на основе полученных ДПК формируются обводы, состоящие из участков непрерывных кривых. Для автоматизации этого процесса разработано программное обеспечение на языке Visual Basic Application, встроенного в пакет SolidWorks. Программа в автоматическом режиме создает в пакете SolidWorks модель линейного элемента каркаса поверхности. Сначала в отдельном файле формируется точечный ряд, координаты которого записываются в текстовый файл. Полученный точечный ряд интерполируется B-сплайном или обводом из дуг кривых второго порядка. При формировании обвода в его узловых точках обеспечиваются значения характеристик, назначенные в этих точках при формировании ДПК. Полученные обводы из непрерывных кривых используются в качестве линейных элементов (направляющих и образующих линий) каркаса поверхности.

4. С помощью стандартных функций SolidWorks (вытянутая поверхность, поверхность по сечениям, поверхность по траектории) на основе каркаса формируется модель поверхности.

На основе полученной модели в автоматизированном режиме разрабатывается управляющая программа для станков с ЧПУ с помощью стандартных функций САМ-пакетов (PowerMill, MasterCAM).

Разработанная методика опробована при решении прикладных задач:

- формирование поверхностей, ограничивающих межлопаточный канал рабочего колеса турбокомпрессора осерадиального типа;
- моделирование рабочей поверхности дисковой фрезы для рыхления почвы в приствольных областях сада;
- оптимизация рабочей поверхности лопатки рабочего колеса центробежного одноступенчатого насоса для перекачивания жидкости.

Рассмотрим задачу моделирования функциональных поверхностей рабочего колеса турбокомпрессора. Исходными данными для проектирования геометрической модели рабочего колеса является чертеж изделия. Функциональная поверхность лопатки задана координатами множества точек, принадлежащих поверхности. Межлопаточный канал ограничен поверхностями ступицы, крышки и соседних лопаток [2].

Модель поверхности лопатки формируется на основе каркаса, состоящего из семейства плоских горизонтальных сечений. Элементы каркаса поверхности формируются на основе точечных рядов, выделенных из исходного массива точек.

Исходный массив точек, состоящий из 105 узлов, разбит на 15 исходных плоских ДПК. На основе исходных точечных рядов сформированы ДПК, каждая из которых состоит из 58 узлов и дифференциально-геометрических характеристик кривой в этих узлах. Узлы полученных ДПК интерполированы В-сплайнами, которые используются в качестве линейных элементов модели поверхности в SolidWorks (рис. 1, а).

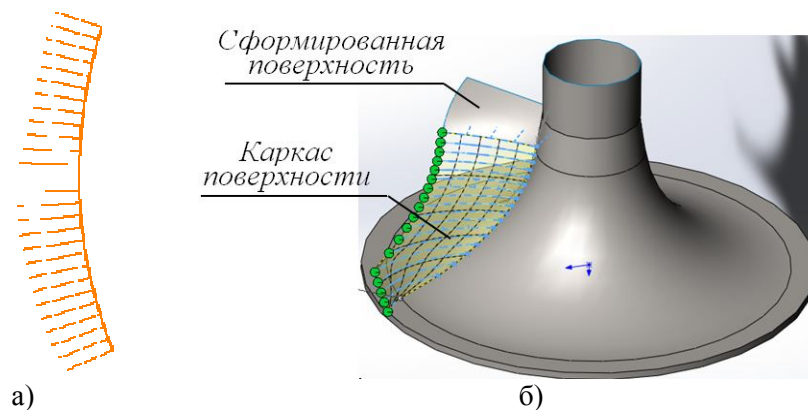


Рис. 1. Формирование каркаса лопатки рабочего колеса

Окончательная модель межлопаточного канала сформирована на основе плоских сечений, ограниченных линиями, принадлежащими ступице, крышке и рабочим поверхностям соседних лопаток. При этом была использована направляющая кривая линия, сформированная на основе исходного точечного ряда, состоящего из 15 центров тяжести плоских сечений межлопаточного канала. Анализ В-сплайнов, сформировавших каркас поверхности, показал монотонное изменение кривизны и кручения вдоль элементов модели.

С помощью модуля SolidWorks Flow Simulation выполнен газодинамический анализ потока газа в межлопаточном канале. Анализ показал монотонное возрастание давления внутри потока.

Аналогичная методика использована при моделировании рабочих поверхностей ножей почвообрабатывающей фрезы и лопатки гидронасоса. Инструмент для рыхления почвы представляет собой фрезу, состоящую из диска с тремя почвообрабатывающими элементами (ножами) (рис. 2, а). В процессе работы ножи осуществляют поступательно-вращательное движение.

Модель поверхности сформирована на основе каркаса, состоящего из направляющей линии и 5 горизонтальных образующих. В качестве направляющей линии используется режущая кромка ножа – цилиндрическая винтовая линия (рис. 2, б).

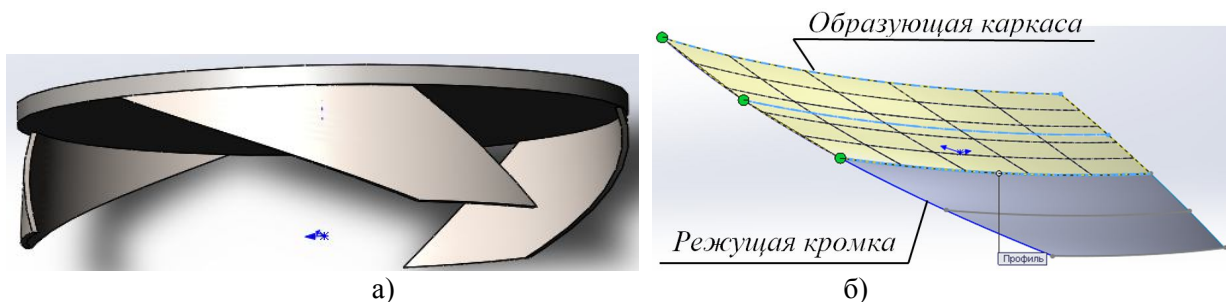


Рис. 2. Формирование рабочей поверхности почвообрабатывающего элемента

Образующие линии модели созданы на основе ДПК, исходные точки которых определены

исходя из траектории движения точек, расположенных на режущей кромке. При этом обеспечивается минимальное отклонение траектории движения точек, задающих горизонтальное сечение ножа, от траектории движения точки этого сечения, расположенной на режущей кромке. Это способствует минимальному уплотнению почвы в процессе обработки [8].

На основе исходных точечных рядов формируются ДПК, характеристики которых обеспечивают монотонное изменение радиусов кривизны вдоль линейных элементов каркаса поверхности – В-сплайнов, интерполирующих полученные точечные ряды. Монотонное изменение кривизны вдоль образующих линий поверхности способствует предотвращению залипания почвой инструмента и снижению затрат энергии при обработке почвы.

Рассмотрим задачу оптимизации конструкции лопатки рабочего колеса центробежного одноступенчатого насоса. Рабочее колесо состоит из двух дисков с расположенными между ними лопатками (рис. 3, а). Поверхности дисков и лопаток ограничивают межлопаточный канал, внутри которого при вращении рабочего колеса перекачивается жидкость. Рабочая поверхность лопатки представляет собой цилиндрическую поверхность, задаваемую контуром поперечного сечения.

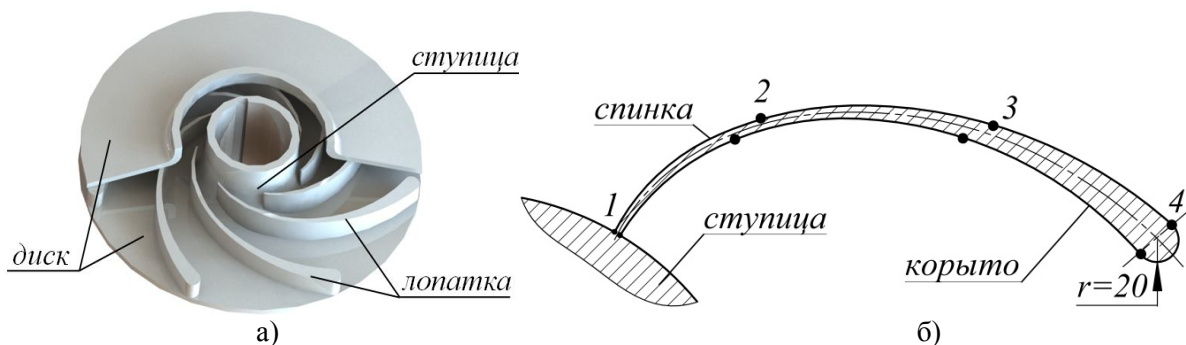


Рис. 3. Моделирование поверхности лопатки рабочего колеса насоса

Исходными данными для создания модели рабочей поверхности является рабочий чертеж изделия-прототипа. Согласно рабочему чертежу контур сечения лопатки горизонтальной плоскостью состоит из трех частей: спинки, корыта и участка окружности, сопрягающей спинку и корыто (рис. 3, б).

Контур спинки и корыта представляют собой коробовые линии, состоящие из трех дуг окружностей, состыкованных с первым порядком гладкости. Для повышения динамических качеств рабочей поверхности лопатки, при создании компьютерной модели изделия, контуры спинки и корыта формируются как обводы второго порядка гладкости с монотонным изменением радиусов кривизны [1]. Контур сформированы на основе точечных рядов, принадлежащих исходным коробовым линиям, представляющим спинку и корыто.

Полученные в результате формирования ДПК точечные ряды, которые представляют профиль спинки и корыта, интерполируются В-сплайнами. Сформированные В-сплайны касательны в конечных точках с кромкой лопатки – окружностью (рис. 3, б). Цилиндрическая поверхность лопатки сформирована средствами SolidWorks как «Вытянутая поверхность».

Выводы. В результате проведенных исследований разработана методика создания геометрических моделей и управляющих программ для станков с ЧПУ по обработке динамических поверхностей, ограничивающих изделия, функциональное назначение которых – взаимодействие со средой.

Управляющая программа создается в автоматизированном режиме с использованием САМ-пакетов (PowerMill, MasterCAM) на основе трехмерной компьютерной модели, сформированной в пакете трехмерного параметрического моделирования SolidWorks.

Компьютерная модель поверхности создается на основе дискретного линейчатого каркаса, представленного семействами образующих и направляющих кривых линий. Исходными данными для создания модели является упорядоченный массив точек, принадлежащих поверхности. Координаты точек могут быть определены по чертежу изделия-прототипа, в результате замеров на физическом образце, исходя из кинематической схемы движения изделия во время работы. Из исходного массива точек выделяются подмножества – точечные ряды, на основе которых формируются линейные элементы каркаса поверхности.

Элементы каркаса поверхности создаются по следующим этапам.

1. На основе исходного точечного ряда формируется дискретно представленная кривая

(ДПК), состоящая из сколь угодно большого количества узлов, исходя из геометрических условий, накладываемых на кривую. Координаты узлов и характеристики ДПК рассчитываются с помощью разработанного программного обеспечения в системе компьютерной алгебры Maple.

2. На основе точечного ряда, полученного в результате формирования ДПК, создается обвод, состоящий из участков непрерывных кривых линий. Модель обвода создается в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, разработанного на языке программирования Visual Basic Application, встроенного в пакет SolidWorks. При создании обвода используются кривые линии, формирование которых обеспечивает пакет SolidWorks: B-сплайн или кривые второго порядка. Полученная модель обвода используется в качестве элемента каркаса поверхности. Окончательная модель поверхности формируется с помощью стандартных функций пакета SolidWorks.

Параметры сгущенных ДПК – количество узлов и характеристики кривой, назначенные в узлах, обеспечивают заданные характеристики обводов – элементов каркаса: второй порядок гладкости, монотонное изменение кривизны и кручения вдоль участков обвода, на которых исходный точечный ряд позволяет это обеспечить.

Разработанная методика позволяет формировать модель поверхности на основе любого точечного массива. Закономерное изменение дифференциально-геометрических характеристик вдоль линейных модели обеспечивает ламинарный характер обтекания поверхности средой.

1. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности / М.Д. Айзенштейн // ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы. - М, 1957. - 363 с.
2. Байков Б.П. Турбокомпрессоры для наддува двигателей / Б.П. Байков, В.Г. Бордуков, П.В. Иванов, Р.С. Дейч – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
3. Гавриленко Е.А. Вариативное дискретное геометрическое моделирование на основе пространственных угловых параметров дискретно представленной кривой второго порядка гладкости / Е.А. Гавриленко, А.В. Найдыш // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Випуск 91. – К.: КНУБА, 2013. – С. 69-75.
4. Гавриленко Е.А. Формирование плоских дискретно представленных кривых по заданным условиям / Е.А. Гавриленко, А.В. Найдыш, Ю.В. Холодняк // Научные итоги: достижения, проекты, гипотезы: сб. науч. докладов XVIII-ой ... науч.-практ. конф., (28 ноября, 2013 г., Минеральные Воды) / СКФ БГТУ им.В.Г. Шухова. – Мин. Воды, 2013. - № 18. - С.139-142.
5. Гавриленко Е.А. Програмна реалізація алгоритму моделювання одновимірних обводів по заданим геометричним умовам / Е.А. Гавриленко, Ю.В. Холодняк // Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». Вип. 13. – Луцьк, 2013.- С.4-9.
6. Гжиров Р.И. Программирование обработки на станках с ЧПУ / Р.И. Гжиров, П.П. Серебrenицкий – Л.: Машиностроение, 1990. – 590 с.
7. Кампти Н. Аэродинамика компрессоров / Н. Кампти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
8. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей / В.А. Осипов. – М.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
9. Синеоков Т.Н. Теория и проектирование почвообрабатывающих орудий / Т.Н. Синеоков. – М., Машиностроение, 1965.– 484с.
10. Холодняк Ю.В. Формирование одномерных обводов с закономерным изменением кривизны / Ю.В. Холодняк, Ю.А. Дмитриев // Динамика систем, механизмов и машин / Омский ГТУ. – Омск, 2014. – № 1. – С. 241-243.

Статья поступила в редакцию

UDK 621.319

A. V. Hadai
**AUTOMATIC SYSTEM OF ARTIFICIAL LIGHTING CONTROLLED BY COLOR
TEMPERATURE**

Artificial lighting is one of the largest consumers of electricity, and at the same time the most promising method to save energy, thanks to the emergence and development of more efficient light sources. Insufficient illumination gives rise to "inhibited" state and deceleration of human response. This leads to the need not only to monitor the compliance with the required level of illumination, but also carefully select the type of light source and its color temperature, depending on the type of work, and time of day in which it is performed. A system is developed which allows reproducing the most important parameters of natural lighting - color temperature and level of illumination, according to their natural fluctuations, and decreases power consumption for artificial lighting. This makes it possible to create a complete model of natural light atmosphere that positively affects productivity of work, and physical and mental activity of man.

Keywords: RGB light-emitting diode (LED), illumination, color temperature, automatic system.

Fig. 5. Tab. 2. Lit. 4.

А. В. Гадай
**АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ З КЕРУВАННЯМ ЗА
КОЛІРНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ**

Штучне освітлення є одним з найбільших споживачів електроенергії, і в той же час найперспективнішим способом економії енергоресурсів, завдяки появі і розвитку більш економічних джерел світла. Недостатня освітленість спричиняє виникнення «загальмованого» стану та сповільнення реакції людини. Це призводить до необхідності не тільки слідкувати, за дотриманням нормативного рівня освітленості, але і ретельно підбирати тип джерела світла і його колірну температуру, в залежності від виду робіт, та часу доби в який вони виконуються. Розроблено систему, що дозволяє відтворювати найважливіші параметри природного освітлення – колірну температуру та рівень освітленості, у відповідності з їх природнім коливаннями та забезпечує зменшення витрат електроенергії на штучне освітлення. Це дає можливість створення повної моделі природної світлової атмосфери, яка позитивно впливає на продуктивність праці, фізичну та розумову активність людини.

Ключові слова: RGB світлодіод, освітленість, колірна температура, автоматична система.

А. В. Гадай
**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ С
УПРАВЛЕНИЕМ ПО ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Искусственное освещение является одним из крупнейших потребителей электроэнергии, и в то же время перспективным способом экономии энергоресурсов, благодаря появлению и развитию более экономичных источников света. Недостаточная освещенность приводит к возникновению «заторможенного» состояния и замедление реакции человека. Это приводит к необходимости не только следить за соблюдением нормативного уровня освещенности, но и тщательно подбирать тип источника света и его цветовую температуру, в зависимости от вида работ и времени суток, в которое они выполняются. Разработана система, позволяющая воспроизводить важнейшие параметры естественного освещения – температуру и уровень освещенности, в соответствии с их естественными колебаниями и обеспечивает уменьшение расхода электроэнергии на искусственное освещение. Это дает возможность создания полной модели естественной световой атмосферы, которая положительно влияет на производительность труда, физическую и умственную активность человека.

Ключевые слова: RGB светодиод, освещенность, цветовая температура, автоматическая система.

Introduction. Many physiological systems of the human body are regulated by internal biological clock. Attention, mental and physical activity, mood, body temperature and many other things change according to the 24-hour cycle. These changes are called circadian rhythm. At the end of the last century, scientists have found out that there is a biological "clockwork" in the brain of mammals, which coordinates the work of the whole body. Man has more than 100 circadian rhythms that interact with each other. For example, blood pressure and work of the brain are subjected to cyclic changes. Circadian rhythm is guided with cryptochrome (CRY) pigment. Cryptochrome proteins CRY1 and CRY2 absorb blue light as it is able to penetrate through several layers of cells in the best way. Signals from them come to the brain, which coordinates the work of trillions of individual "molecular clocks" which exist in the human body. This ensures 24-hour cycle of living.

Problem statement. Natural light and its rhythm during twenty-four hours and in the annual cycle plays a dominant role in synchronizing the biological clock as well as day-night and seasonal physiological and psychological rhythms. Light provides direct stimulatory effect on man's mood. However, it is impossible to fully provide room lighting only with natural light. Therefore, it is necessary

to use automatic devices in order to create an artificial lighting system which is most comfortable for man.

Analysis of recent research and publications. Natural light is very important for man, improvement of his psychophysical condition and enhancement of productivity of work. Variation of intensity and spectral composition of light is typical for solar emission during the day and is a natural regulator of human life. In the daylight hours sunlight is characterized by high intensity, high color temperature and a high proportion of blue emission. In the evening hours the intensity of these components is greatly reduced. Man adapted to such fluctuations of light parameters. Change in mental and physical activity during 24 hours depends on the biological rhythm of a man, which is actually determined by three parameters: intensity, color temperature and the presence of the blue component of solar emission [1].

Analysis of existing systems of artificial lighting has shown that the most effective devices are those built on the principle of automatic control of lighting levels. However, they do not take into account the emission spectra of individual colour components of light.

The purpose of the article. It is proposed to use automatic lighting control systems, which allows reproducing the main parameters of natural light atmosphere - change in color temperature and brightness of lighting, in real time.

Basic materials of research. Today, it is virtually impossible to completely reproduce natural lighting parameters using the existing light sources. This is due to the difficulties of creating the light sources with the spectrum similar to the one of natural light. Changing the color temperature of the light source became technically possible only recently, in connection with the development and implementation of RGB light-emitting diodes (LEDs). Their feature is the inclusion of three light-emitting crystals in one case with a common optical system. This enabled getting all possible shades of colors distinguished by man by changing the current value independently for each of the crystals. RGB LEDs have the spectrum which is the most corresponding to the sensitivity of the human eye, and allow adjusting the color temperature [2].

The operational principle of the automatic artificial lighting system proposed is as follows (Fig. 1). In case of appearance of a man in the room, the motion sensor authorizes the microcontroller to read information from the illumination sensor about the intensity level of the emission spectra of red, green and blue components separately, and the total value of natural illumination level. The obtained value is compared with the set one, and if there is a mismatch, the intensity value of each colour is proportionally adjusted. This allows changing illumination level at a constant color temperature. Information about intensity of glowing of each color is fed from the microcontroller to the execution unit which generates control pulses for LED light source crystals.

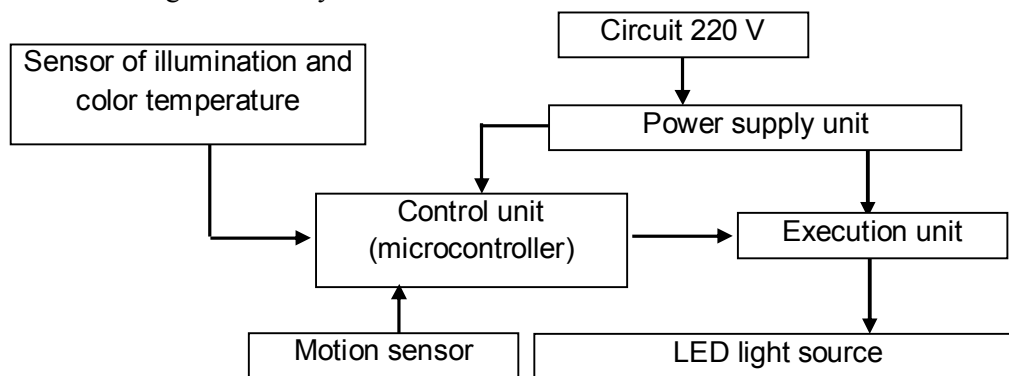


Fig. 1. Functional diagram of automatic lighting control system

Let us consider the work of each element of the system in detail.

The basis of the system is the control unit based on ATmega16L-8PU microcontroller by ATMEL company [3] (Fig. 2). Using a microcontroller in this system as a controlling device allows implementing in software the processing of information derived from sensors, its comparison with the data about the necessary level of illumination, adjustment of light parameters and generation of control pulses to control the light source.

To reproduce the desired color temperature it is enough to have a numerical value of two coordinates on the chromaticity diagram plane (Fig. 3). At that, the horizontal axis of the diagram characterizes saturation of particular color, and vertical one characterizes its hue.

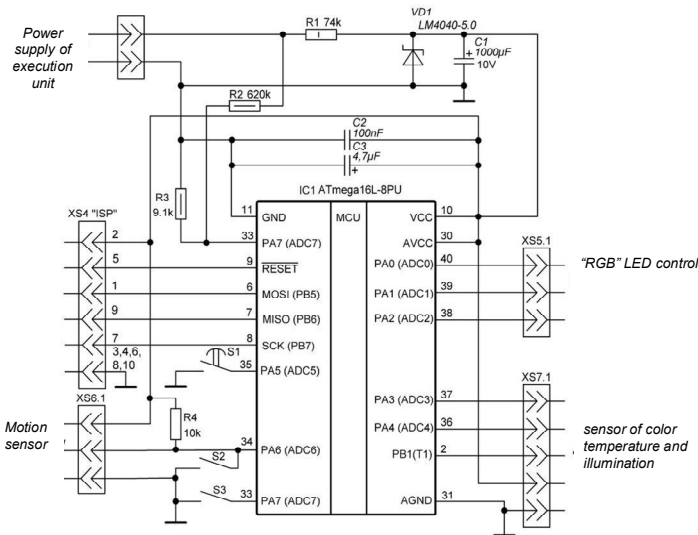


Fig. 2. Principle diagram of the microcontroller control unit

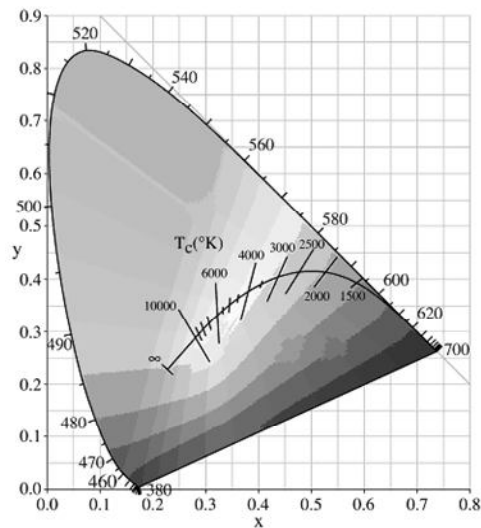


Fig. 3. Diagram of chromaticity in x, y system

The basis of the principle diagram (Fig. 4) is HV9961 LED driver, which allows stabilizing the current through the LED, regardless of external factors such as mains voltage fluctuations and temperature change. An additional advantage of using LED in the system is its emission spectrum that has the form corresponding to the sensitivity of the human eye. [4]

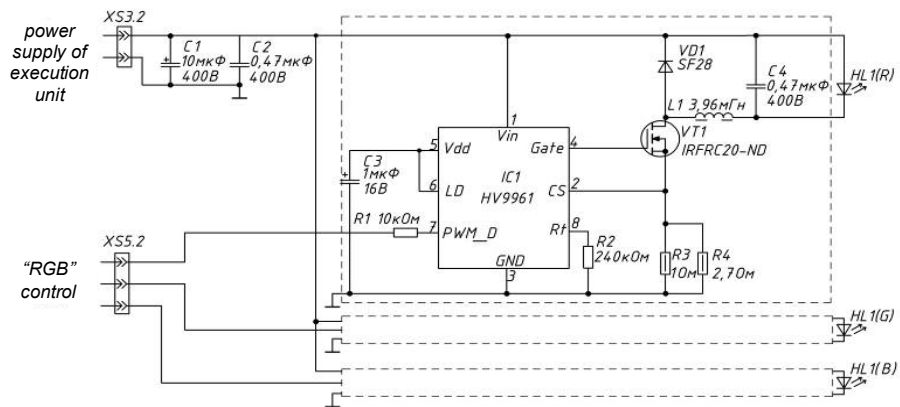


Fig. 4. Principle diagram of the execution unit using RGB LED

Exact maintaining of the set level of illumination and color temperature is achieved by introducing of color sensor into the system, which is located outside and changes the parameters of illumination in the

room according to natural light changes. TCS3200 microcircuit chip - illumination-frequency converter – is used as the sensor of color temperature and illumination (Fig. 5 a).

The operation principle of the color temperature sensor is as follows (Fig. 5 b). RGB-filters disperse impinging light into red, green and blue components. Photodiode, which is located under the corresponding filter, converts brightness into current, and then operational amplifiers with current input convert the change of current into the change of frequency. Principle diagram of switching-on is shown in Fig. 5 c. This microcircuit chip provides linear dependence of frequency on illumination (about 1 kHz per 1lux) and spectral sensitivity close to the sensitivity of the human eye.

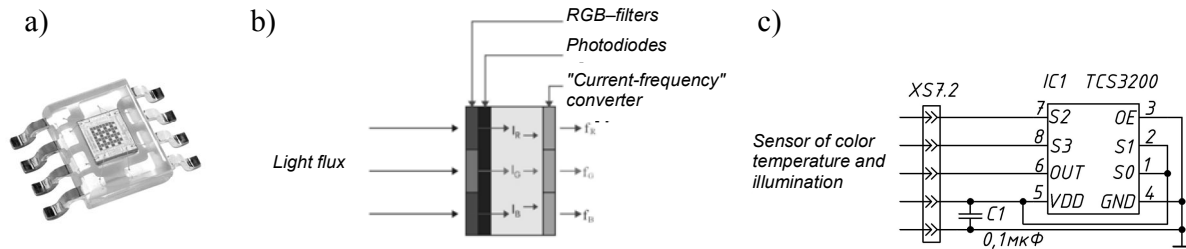


Fig. 5. TCS3200 sensor of color temperature and illumination

S0 and S1 leads are designed for scaling of the output frequency and consequently sensor sensitivity (Table 1). For this purpose, high (H) or low (L) logic levels are fed to the sensor leads.

Table 1. Scaling of output frequency of the sensor

S1	S0	Scaling of output frequency
L	L	Sensor switching-off
L	H	2% (0–12 kHz)
H	L	20% (0–120 kHz)
H	H	100% (0–600 kHz)

S2 and S3 leads are designed for switching to the OUT lead of one of the four arrays of photodiodes for reading of information about illumination level (Table 2).

Table 2. Selection of photodiode

S2	S3	Photodiode type
L	L	red
L	H	blue
H	L	white (without filter)
H	H	green

To read information about brightness of illumination in different spectra, corresponding logic levels are generated at ADC3 and ADC4 leads of the microcontroller. Linear dependence of the sensor frequency on illumination and closeness of its spectral sensitivity to the human eye sensitivity considerably simplify the program and allow achieving high accuracy in reproduction of the natural light spectrum.

Conclusions. From the given material, it follows that in addition to the positive impact on productivity of work and physical and mental activity of man, the proposed system provides significant savings of electricity compared to existing lighting systems. This device has a wide practical application, because it can be used in all areas of human activity where there is a need to create artificial lighting for a long time.

1. Light's Labours Lost – Fact Sheet // International energy agency [Electronic resource]. – mode of access: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/lightfact.pdf>.
2. F. Schubert. Light-emitting diodes / F. Schubert. – Moscow: PHYSMATHLIT, 2008. – 496 p.
3. ATmega16 – User Guide / Atmel Corporation [Electronic resource]. – mode of access : <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>.
4. Four Great Reasons to Dim – Lutron Electronics [Electronic resource]. – mode of access: <http://europe.lutron.com/dim.htm>.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2015.

УДК 621.312

А. В. Гадай
ДИНАМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ РЕГУЛЬОВАНИХ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ БУРОВИХ УСТАНОВОК

Отримано залежність за якою доцільно керувати потужністю пристроїв компенсації реактивної потужності регульованих у неусталених режимах роботи електроприводів бурових установок.

Ключові слова динамічна компенсація реактивної потужності, електропривод бурових установок, різко змінне навантаження, спектральний опір, спектральна провідність.

Рис. 7. Літ. 3.

А. В. Гадай
ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Получена зависимость, по которой целесообразно управлять мощностью устройств компенсации реактивной мощности регулируемых в неустановившихся режимах работы электроприводов буровых установок.

Ключевые слова: динамическая компенсация реактивной мощности, электропривод буровых установок, резко переменная нагрузки, спектральное сопротивление, спектральная проводимость.

A. Gadai
THE DYNAMICAL REACTIVE POWER COMPENSATION OF ADJUSTABLE
ELECTRIC DRILLING RIGS

The dependence on which it is advisable to control the power factor correction units regulated in transient modes of operation of electric rigs.

Keywords: dynamic reactive power compensation, electric rigs, cutting variable load, spectral impedance, spectral conductivity.

Постановка проблеми. Динамічні процеси, що виникають у неусталених режимах роботи устаткування бурових установок, таких як електробура, призводять до суттєвого відхилення значень енергетичних характеристик від оптимальних. Це у свою чергу потребує ґрунтовних методів їх дослідження та обробки результатів для підвищення ефективності буріння свердловин. Для цього необхідно визначити вплив різко змінного моменту двигуна на енергетичні характеристики та компенсацію реактивної потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При дослідженні неусталених режимів роботи асинхронних та синхронних двигунів достатньо точні результати дають чисельні методи. Ці методи ґрунтуються на повних рівняннях Парка-Горева. Для оцінки режимів роботи окремих або групи одночасно працюючих двигунів у вузлі навантаження електричної мережі необхідно визначити показники якості перехідних процесів, до яких можна віднести час, вид коливань і статичну стійкість. Для нелінійних систем використовуються інтегральні квадратичні показники якості перехідного процесу.

Неусталені режими асинхронних та синхронних двигунів досліджено в фундаментальних роботах І. А. Сиромятникова [1]. Однак питання динамічної компенсації реактивної потужності в таких режимах не вивчалися.

Аналіз існуючих пристроїв динамічної компенсації показав, що найбільш ефективними та довершеними є пристрої, що побудовані на основі статичних тиристорних компенсаторів (СТК). Однак їх інформаційне забезпечення в неусталених режимах двигунів вимагає вдосконалення.

Мега статті. Пропонується використовувати поточну величину реактивної провідності для керування пристроїв СТК в мережах з електроприводами бурових установок, які працюють із різкозмінним навантаженням

Основні матеріали дослідження. Інтенсивний розвиток нафтогазових промислів характеризується все більшим віддаленням від енергетичних і транспортних центрів. З іншої сторони, бурові установки мають певні особливості електроспоживання. Застосування електротехнологічного обладнання, що перетворює електричну енергію за допомогою дискретного керування комутації вентильних елементів призводить до фазового зсуву вищих гармонік струму й напруги. У результаті у розподільну мережу СЕП генерується реактивна потужність і потужність спотворення, що знижує енергетичні показники привода виробничих механізмів.

На рис.1 наведено динаміку зміни обертового моменту електробура Е164-8МР, отримана за допомогою системи контролю енергетичних параметрів електробура СКЕП-2 [2].

В [3] для аналізу енергетичних процесів під час перехідних процесів асинхронних електроприводів введено поняття поточних значень активної та реактивної складових спектрального опору

$$R_c(t) = \frac{P(t)}{I^2(t)}; \quad X_c(t) = \frac{Q(t)}{I^2(t)} \quad (1)$$

і провідності

$$g_c(t) = \frac{P(t)}{U^2(t)}; \quad b_c(t) = \frac{Q(t)}{U^2(t)}. \quad (2)$$

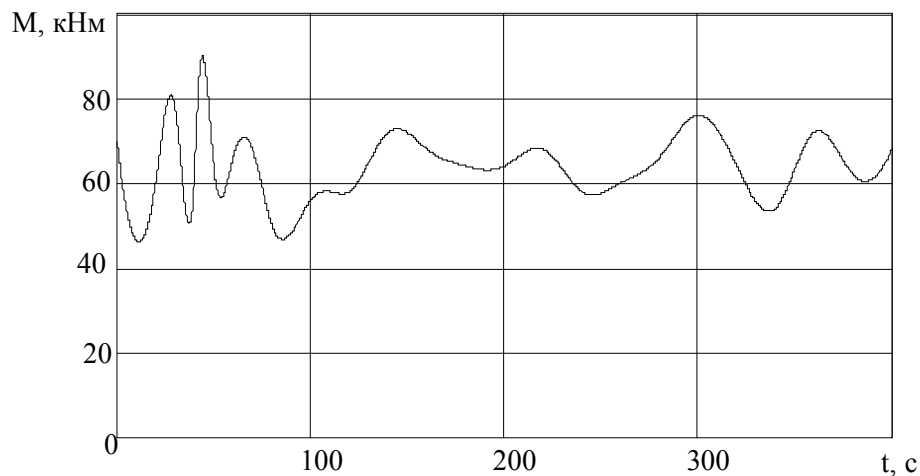


Рис. 1. Динаміка зміни обертового моменту електробура Е164-8МР під час буріння свердловини на глибині 2550 м

Для аналізу енергетичних процесів під час різко змінного режиму роботи асинхронного електроприводу введено поняття поточних значень активної та реактивної потужностей

$$P(t) = \int_{t-T/2}^t u i_c dt; \quad Q(t) = \int_{t-T/2}^t u i_x dt. \quad (4)$$

На рис. 2 наведено графіки зміни поточних значень активної та реактивної потужностей під час роботи електробура.

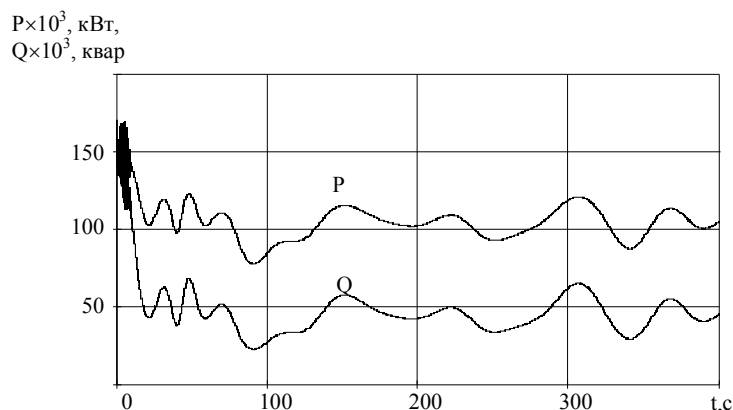


Рис. 2. Динаміка зміни поточних значень активної та реактивної потужностей

Визначимо значення таких енергетичних показників, як коефіцієнт потужності й реактивна провідність:

$$l = \sqrt{R_c g_c}, \quad b_c(t) = \frac{Q(t)}{U^2(t)}. \quad (5)$$

Згідно отриманих значень побудовані графіки зміни коефіцієнта потужності (рис. 3) та реактивної провідності (рис. 4)

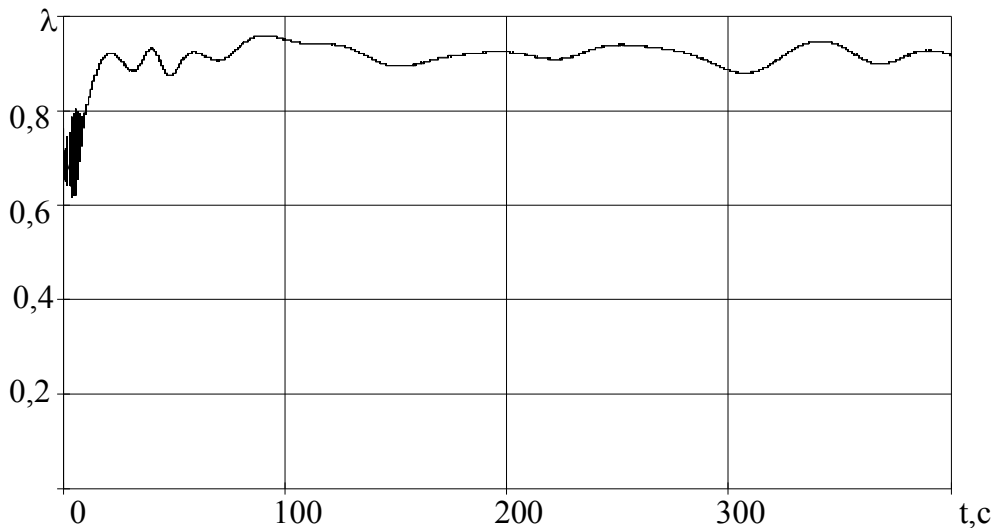


Рис. 3. Графік зміни значення коефіцієнта потужності при заданому динамічному моменті

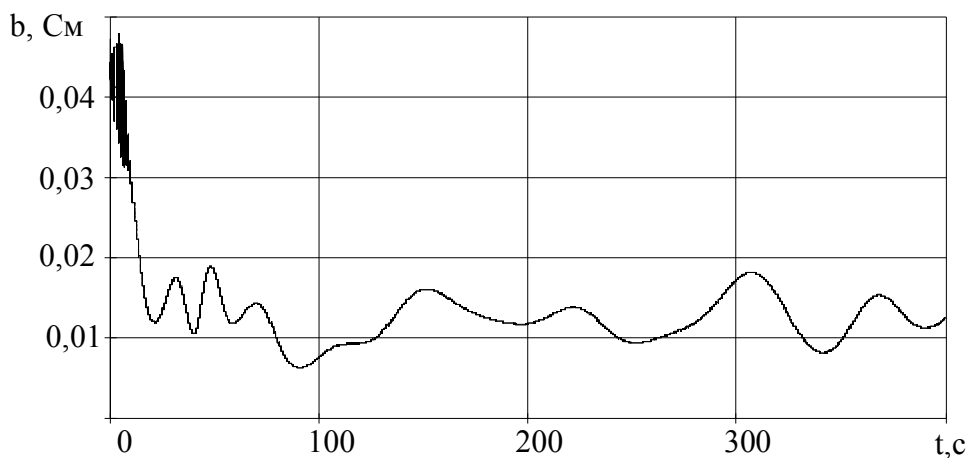


Рис. 4. Графік зміни значення реактивної провідності при заданому динамічному моменті

Вирішенням проблеми підвищення якості електроенергії в системі постачання бурової установки, що містить електроприводи з напівпровідниковими перетворювачами, є застосування СТК. Структурна схема системи динамічної компенсації реактивної потужності електроприводів за допомогою СТК наведена на рис. 5, де позначено трифазне джерело живлення (ДЖ), електропривід бурової установки (ЕПБУ) та СТК. Керування блоком тиристорно-регульованих реакторів (БТРР) здійснюється за допомогою системи імпульсно-фазового керування (СІФК), інформація про навантаження ЕПБУ на входи якого поступає з виходів вимірювального каналу (ВК), який, в свою чергу, приєднаний до лінії живлення ЕПБУ через вимірювальні трансформатори струму (ТС) та напруги (ТН). Вимірювальний канал складається з масштабних перетворювач струмів фаз (ПС) та напруг (ПН) в ортогональну систему напруг, чотирьох фазочутливих інтегровальних перетворювачів (ФП1–ФП4), мікроконтролера (МК).

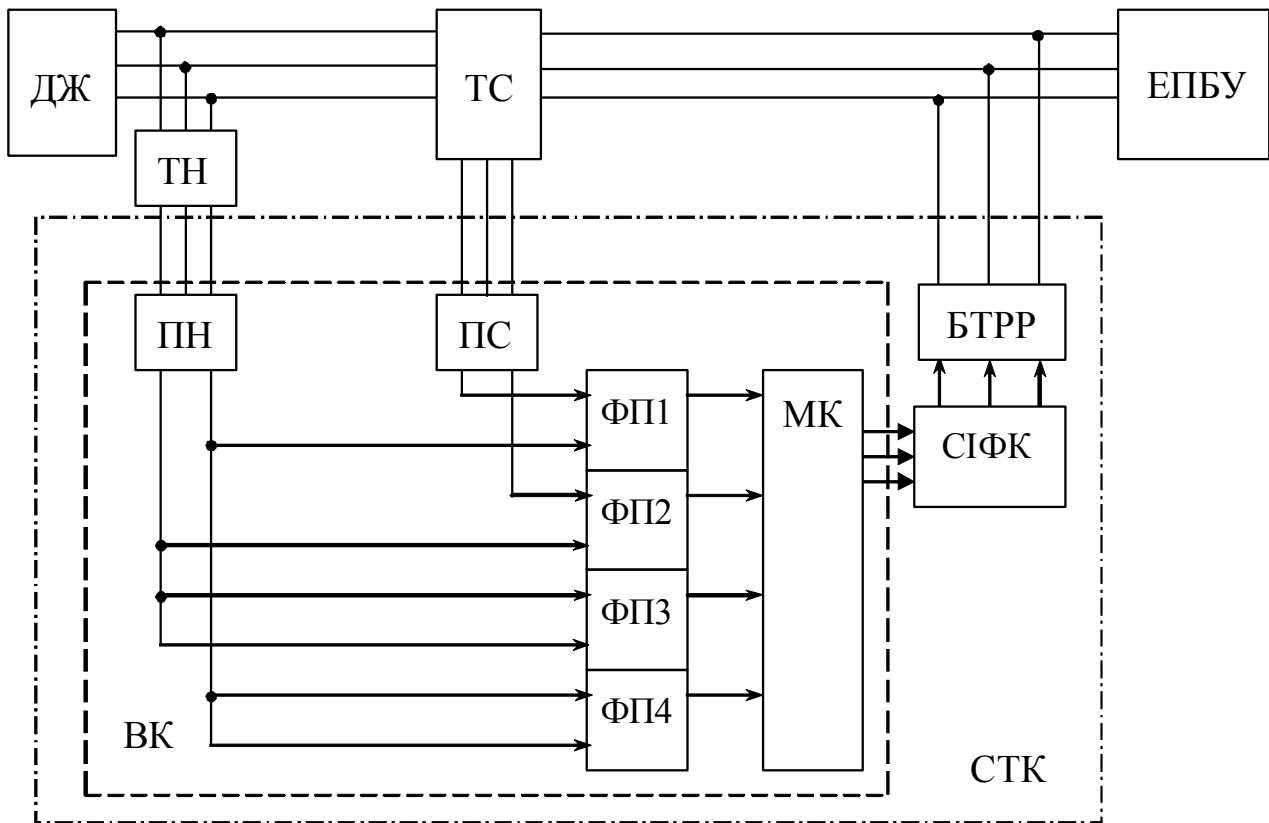


Рис. 5. Структурна схема системи динамічної компенсації реактивної потужності

З метою виключення вимірювального перетворення фазового обертання для отримання квадратурних складових струму, якому притаманні значні похибки, визначення поточних значень активної та реактивної потужності, а також квадрату струму та напруги здійснюється за формулами:

$$\begin{aligned}
 P(t) &= \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_a i_a + u_b i_b) dt; \\
 Q(t) &= \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_b i_a - u_a i_b) dt; \\
 I^2(t) &= \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (i_a^2 + i_b^2) dt; \\
 U^2(t) &= \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_a^2 + u_b^2) dt,
 \end{aligned} \tag{6}$$

де i_a , i_b , u_a , u_b – ортогональні складові напруг та струмів трифазної системи.

Мікроконтролер МК визначає поточні значення реактивної провідності $b_c(t)$ і формує сигнали керування для системи імпульсно-фазового керування (СІФК), який забезпечує безпосереднє керування блоком тиристорно-регульованих реакторів (БТРР) СТК. Запропонований вимірювальний канал характеризується практичною незалежністю результатів від несиметрії струмів та вмісту вищих гармонік, що є однією з їх переваг.

У результаті компенсації реактивної потужності засобами СТК із заданими параметрами промислового обладнання графік споживання набув наступного вигляду (рис. 6).

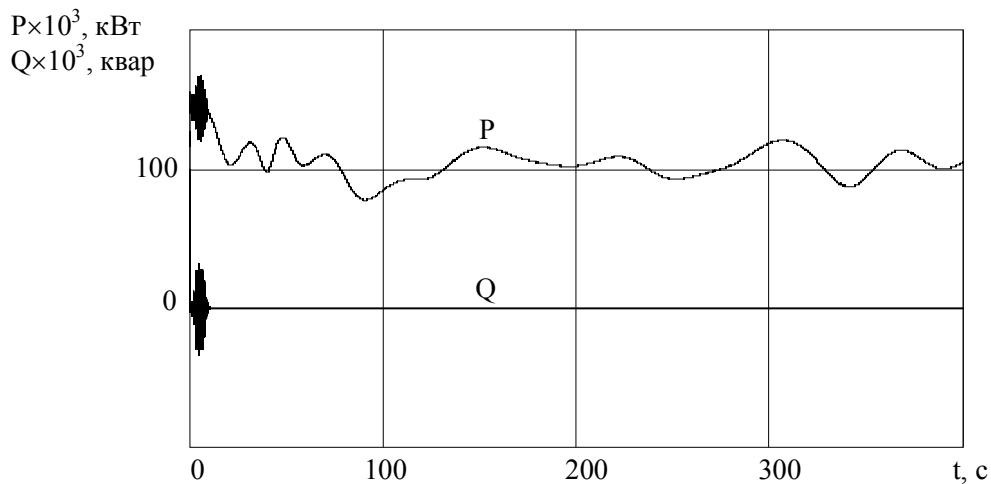


Рис 6. Динаміка зміни поточних значень активної та реактивної потужностей після динамічної компенсації реактивної потужності

При цьому значення споживаного приводом струму дещо зменшилось (крива 2), у порівнянні з величиною до компенсації (крива 1) (рис. 7).

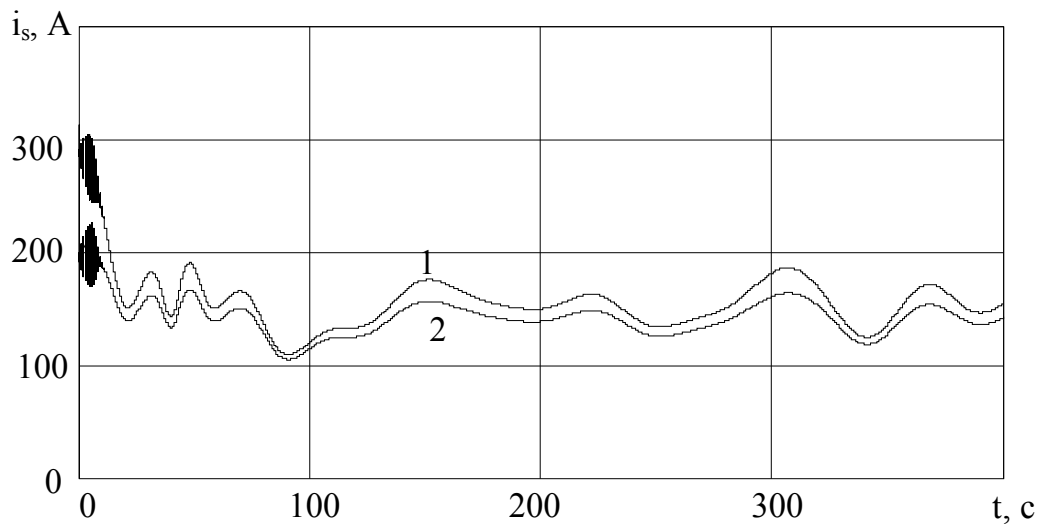


Рис. 7. Залежність модуля узагальненого вектора струму статора до (1) та після компенсації (2)

Висновки. З наведеного матеріалу слідує, що застосування пристроїв СТК з керуванням за реактивною провідністю $b_C(t)$ забезпечує повну компенсацію реактивної потужності регульованих електроприводів бурових установок із різкозмінним навантаженням.

1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Гладь І. В. Підвищення надійності електробурового обладнання / І. В. Гладь, М. Й. Федорів // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2006. - №1(76).
3. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів. Монографія. / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2014.

Р.Т. Гарматюк¹, І.В. Чихіра²

¹Кременецький обласний гуманітарно-педагогічний інститут ім. Тараса Шевченка

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ПОЛИМЕРКОМПОЗИЦІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

В роботі проаналізовано умови експлуатації відцентрових насосів. Показана можливість використання полімеркомпозиційних матеріалів для захисту деталей відцентрових насосів.

На основі проведених досліджень був розроблений склад композиції і технологія її нанесення на деталі складного профілю.

Ключові слова: полімерна матриця, адгезійна міцність, полімеризація.

Р.Т. Гарматюк, И.В. Чихира

ПОЛИМЕРКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В работе проанализированы условия эксплуатации центробежных насосов. Показанная возможность использования полимеркомпозиционных материалов для защиты деталей центробежных насосов.

На основе проведенных исследований был разработан состав композиции и технология ее нанесения на детали сложного профиля.

Ключевые слова: полимерная матрица, адгезионная прочность, полимеризация.

R.T. Garmatiuk, I.V. Chyhira

POLIMERKOMPOZYTSIYNI COATINGS FOR PROTECTION OF DETAILS CENTRIFUGAL PUMPS

External of chempumps environments are in-process analysed. The shown possibility of the use of polymer composite materials is for defence of details of chempumps.

On the basis of conducted investigational there was the worked out composition of composition and technology of her causing on the detail of hard-to-make.

Keywords: polymeric matrix, adhesion strength, polymerization.

Постановка проблеми. Устаткування нафтової і газової промисловості експлуатується в умовах дії абразивних та агресивних середовищ, підвищених і низьких температур, високих швидкостей і контактних тисків, а іноді і динамічних навантажень. Це супроводжується складними фізико-хіміко-механічними процесами, що виникають при мікроударній дії рідини на поверхню твердого тіла.

Основним робочим органом магістральних насосів є колесо, відлите із сталі або чавуну. Значна шорсткість коліс вимагає додаткової механічної обробки. Проте важкодоступні ділянки, зокрема, лопатки обробити не можливо, внаслідок чого погіршуються гідродинамічні характеристики насосів. Крім цього, в процесі експлуатації відбуваються гідроабразивне зношування і корозія поверхні робочих коліс. В результаті дії вказаних чинників знижується к.к.д. насосів і зростає витрата електроенергії. Враховуючи енергоємність нафтоперекачувального устаткування завдання економії паливно-енергетичних витрат є дуже актуальне.

Для захисту деталей машин від гідроабразивного зношування і корозії та поліпшення гідродинамічно характеристик насосів використовують різні покриття [1, 2]. Застосування хіміко-термічної обробки (ХТО) деталей, особливо дифузійне хромування [2], істотно підвищує їх ерозійно-кавітаційну стійкість. Широке застосування при ремонті гідротурбін і робочих коліс відцентрових насосів отримали різні способи електродугового наплавлення хромистих і хром-никелевих сталей стійких до кавітації [3]. Представляє інтерес спосіб гумування деталей, схильних до ерозійного-кавітаційного зношування [4]. Проте великі габарити і маса коліс, їх складна конфігурація, а також мала товщина отриманого покриття не дозволяють застосовувати ці види обробки.

В якості матеріалу для покриття можна використати, полімерну композицію на основі модифікованої епоксидної смоли. Вибір смол для створення матриці обумовлений тим, що вони мають хорошу плинність (на стадії переробки) при заповненні проміжків, щілин і капілярів, можуть змішуватися з різними наповнювачами (металевими, мінеральними, органічними), змінюють властивості в необхідному напрямі, забезпечуючи високу щільність матеріалу. Крім цього, при затвердінні ці смоли дають незначну усадку, що знижує внутрішні напруження.

Полімерна матриця на основі епоксидних смол характеризується також високою адгезією до різноманітних матеріалів, значною термічною і хімічною стійкістю, не викликає корозії дотичних до неї матеріалів і по зносостійкості близька до алюмінієвих сплавів [5].

В якості наповнювача можуть бути використані тугоплавкі з'єднання. Найбільш перспективні з них металопоподібні карбіди, нітриди, бориди тугоплавких перехідних металів IV-VI груп Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва, а також складні з'єднання (карбонітриди, карбобориди, оксикарбіди) [6].

Хороша плинність і великий термін існування полімерної матриці дозволяють наносити будь-яким відомим способом (намазування, занурення, пульверизація та ін.), що значно розширює сферу його застосування. Гетерогенні системи представляють як би багатоклейове з'єднання матеріалу наповнювача, при цьому механічні властивості композиту безпосередньо залежать від адгезійних і міцнісних властивостей полімерної матриці. На адгезійні властивості епоксидних клеїв (матриць гетерогенних систем) значно впливають кількість, а також хімічний склад і режим затверджування [7].

Мета роботи. Розробити полімер композиційний матеріал для захисту деталей відцентрових насосів і дослідити його властивості.

Матеріали та методика досліджень: В якості плівкоутворювача використали епоксидні олігомери ЕД-16, ЕД-20, які затверджували рідким ізометилтетрагідрофалевим ангідридом (ізо-МТГФА) у присутності триетаноламіну. В якості тугоплавких наповнювачів використали карбіди бору і кремнію дисперсністю 60-80 мкм. Щоб запобігти седиментації, в композицію додатково вводили мілкодисперсні порошки оксидів алюмінію і хрому, а також аеросил АДГЭ-300. Залежність адгезійних властивостей від часу полімеризації композиції вивчали при рівномірному зсуві і відриві клейових з'єднань. Границю міцності при цьому визначали по відповідно до Держстандарту, причому при встановленні границі міцності на відрив використали пристрій у вигляді грибка з конічним захватом для самоцентрування. Площа склеювання зразків із сталі 45 внапуск і у стик складала 1 см². Зразки випробовували на розривній машині ДМ-30М.

Обговорення результатів. Полімерну матрицю готували на основі низькомолекулярної епоксидної смоли, яку обробляли ангідридним затверджувачем. При дослідженні впливу часу полімеризації на границю міцності при рівномірному відриві і зсуві було встановлено, що зі збільшенням цього часу до 7 год. напруження зростає. Подальше збільшення часу витримки погіршує адгезійні властивості, що, мабуть, пов'язано з частковою деструкцією полімеру (рис. 1).

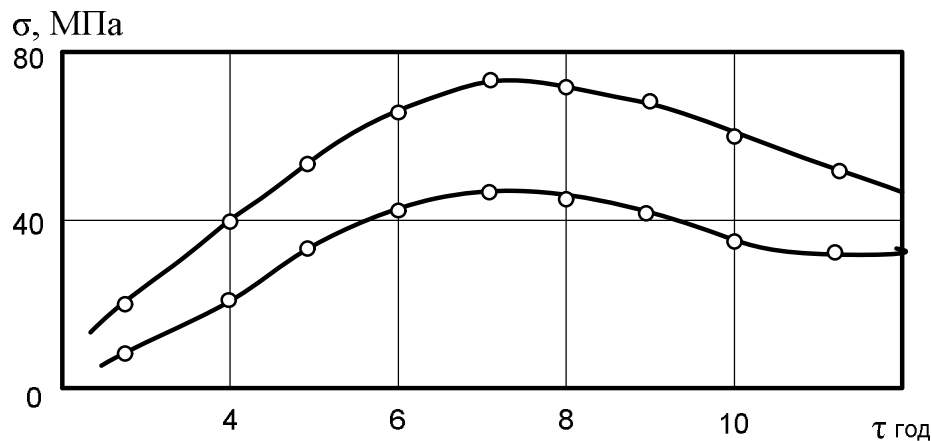


Рис. 1. Залежність границі міцності композиції а від часу термообробки τ при рівномірному відриві (1) і зсуві (2)

Враховуючи відносно низьку в'язкість композиції, цікаво дослідити процес усадки. Результати показали, що зі збільшенням об'ємної долі затверджувача в композиції від 30 до 60% усадка збільшується прямо пропорційно (рис. 2). Підвищення об'ємного вмісту затверджувача до 70% різко збільшує усадку композиції на основі смоли ЕД-20 і при об'ємній долі затверджувача 80% усадка складає близько 2,7%, максимальна усадка композиції на основі смоли ЕД-16 — 1,7%. Різке збільшення усадки композиції, що містить більше 60% затверджувача, мабуть, пов'язане з тим, що при температурі полімеризації випаровується затверджувач, що не вступив в реакцію з епоксидним олігомером.

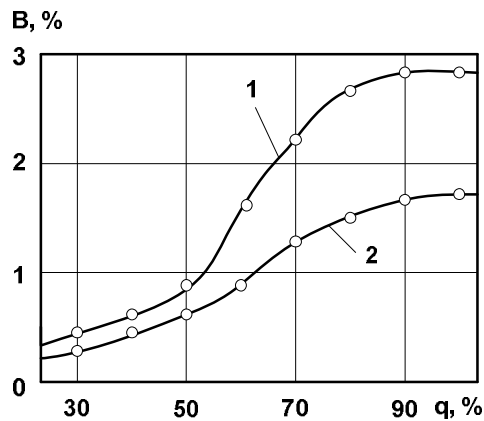


Рис. 2. Вплив кількості затверджувача полімерної матриці q на її усадку B : 1, 2 — затверджені відповідно ЕД-20 і ЕД-16

В якості тугоплавких наповнювачів використали карбіди бору і кремнію дисперсністю 60-80 мкм. Проте, як показали дослідження, введення наповнювачів з щільністю вище за $2,5 \times 10^3$ кг/м³ і дисперсністю більше 40 мкм призводить до їх седиментації. Щоб запобігти цьому, в композицію додатково вводили мілкодисперсні порошки оксидів алюмінію і хрому, а також аеросил АДГЭ-300. Зміна концентрації мілкодисперсних наповнювачів показала, що введення понад 3 мас. ч. аеросилу запобігає седиментації основного наповнювача, проте при цьому істотно погіршується покриваюча здатність композиційного матеріалу; оксид хрому або алюмінію необхідно вводити у кількості 30-50 мас. ч., при цьому технологічні властивості зберігаються.

Оскільки властивості реологій досліджуваних композицій не підкоряються закону Ньютона і в процесі їх течії відбувається деформація і орієнтація уздовж потоку лінійних макромолекул полімеру, була розроблена методика визначення умовної в'язкості, яка характеризується градієнтом швидкості деформації і руйнування структури композиції при течії її по похилій площині. Кут нахилу площини змінювали від 30 до 90°. На підкладку в горизонтальному положенні наносили по 3 см³ композиційного матеріалу, потім її встановлювали під потрібним кутом. В'язкість наповненого зразка характеризували відношенням довжини його потьоків до довжини потьоків ненаповненого зразка (у відсотках). Цим методом досліджували вплив концентрації, дисперсності і форми часток наповнювача на реологічні властивості композиції.

З рис. 3 видно, що зі зміною дисперсності наповнювачів В₄С і SiC від 40 до 125 мкм при однаковій мірі наповнення умовна в'язкість композиції знижується. Проте характер зміни умовної в'язкості значною мірою залежить від щільності речовини і форми часток наповнювача. Додаткове введення в полімерну композицію антиседиментаційних добавок призводить до помітного прояву тиксотропного ефекту (рис. 4).

На якість покриття, як свідчать результати проведених досліджень, впливає міра зволоження наповнювача в'язучим матеріалом, яка значно залежить від в'язкості останнього. В'язкість епоксидної смоли, можна змінити введенням в неї органічного розчинника або підігріванням при температурі 20-100 °С. Введення до 25% розчинника або нагрів смоли до 45 °С зменшує в'язкість від 65 до 5×10^{-1} Па·с. (рис. 5).

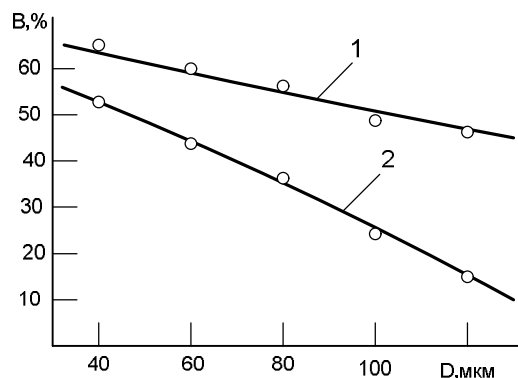


Рис. 3. Залежність умовної в'язкості B композицій від дисперсності тугоплавкого наповнювача D В₄С(1) і SiC (2). Кут нахилу площини 40°. Кількість наповнювача 150 мас. ч.

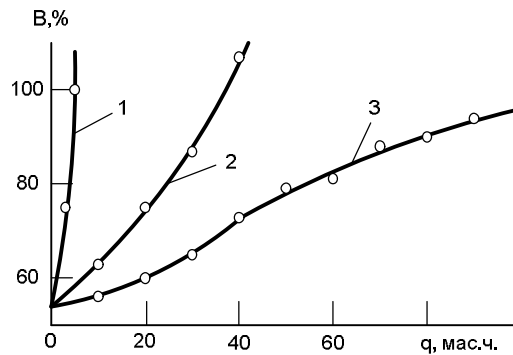


Рис. 4. Залежність умовної в'язкості композицій В від кількості мілкодисперсних наповнювачів q , SiO_2 (1); A_2O_3 , (2), Cr_2O_3 (3) при вмісті 100 мас. ч. V_4C дисперсністю 60 мкм. Кут нахилу площини 40°

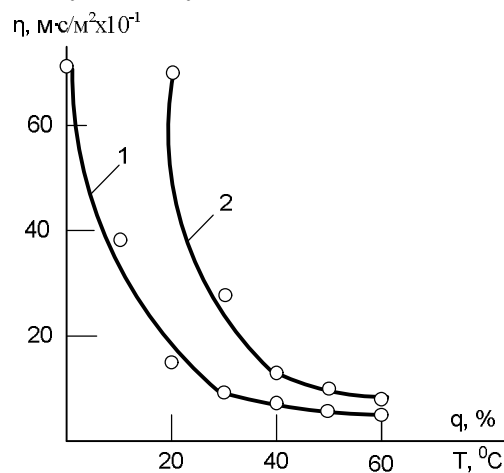


Рис. 5. Залежність в'язкості епоксидної смоли від кількості розчинника (1) і температури нагріву (2)

Підігрівання доцільніше і технологічніше. Композицію, що складається з полімерної матриці і наповнювача, заздалегідь просушеного в термошафі при температурі 200°C впродовж 2 год, готують перемішуванням в шнековій мішалці з електропідігрівом до отримання однорідної маси.

Для вивчення зносостійкості покриття була сконструйована установка, що імітує роботу колеса відцентрового насоса у важких умовах.

Висновки. В результаті досліджень встановлено, що зносостійкість полімеркомпозиційного покриття приблизно в 3,5 рази вище, ніж сталі 20 Л. Це дало можливість застосувати для захисту деталей відцентрових насосів перекачувального устаткування полімеркомпозиційне покриття на основі епоксидної матриці і тугоплавкого наповнювача. Виробничі випробування робочих коліс із захисним покриттям, показали, що к.к.д. насосів збільшується на 2-3%, а також збільшується в 1,5 рази міжремонтний період.

У зв'язку з цим була розроблена технологія нанесення полімеркомпозиційного покриття на робочі колеса відцентрових насосів.

1. Фокин М. Н., Емельянов Ю. В. Защитные покрытия в химической промышленности / М.Н. Фокин, Ю.В. Емельянов. – М.: Химия, 1981. – 320 с.
2. Рейбман А.И. Защитные лакокрасочные покрытия / А.И. Рейбман – Л.: Химия, 1982. – 320 с.
3. Дубинин Г. Я. Диффузионное хромирование сплавов / Г.Я. Дубинин – М.: Машиностроение, 1964. – 260 с.
4. Прейс Г. А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г.А. Прейс, Я. А. Сологуб, А. И. Некоз – М.: Машиностроение, 1979. – 203 с.
5. Князев В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении / В.К. Князев – М.: Машиностроение, 1977. – 179 с.
6. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения (справочник) / Г.В. Самсонов, И.М. Винницкий – М.: Metallurgy, 1976. – 530 с.
7. Кардашов Д. А. Конструкционные клеи / Д.А. Кардашов – М., Химия, 1980. – 286 с.

УДК 514.8

Л.С. Громко, С.І. Пустюльга, Ю.В. Клак

Східно-Європейський національний університет, Луцький національний технічний університет, Україна

**МЕТОД ЗНАХОДЖЕННЯ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ**

Дана робота присвячена аналізу відомих підходів до пошуку множини Парето-оптимальних розв'язків багатокритеріальних оптимізаційних задач. Визначено, що основною проблемою таких способів є кінцевий вибір однієї оптимальної точки на основі суб'єктивної думки експерта. Суттєвим недоліком такого вибору є необхідність додаткової інформації, яка відсутня у початковій постановці задачі оптимізації. Запропоновано удосконалений метод знаходження Парето-оптимальних рішень багатокритеріальних оптимізаційних задач на основі введення множини критеріїв якості, які у сукупності дозволяють, без втручання експертів, визначити найкращий вектор розв'язку. Перевірено ефективність запропонованого алгоритму на тестовому прикладі ранжування кафедр МБФ Луцького НТУ за заданою множиною критеріїв ефективності їх роботи.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, Парето-оптимальні розв'язки, критерії оптимізації, вектор багатомірною простору, множина критеріїв якості.

Рис. 1. Форм. 11. Табл. 4. Літ. 10.

Л.С. Громко, С.И. Пустюльга, Ю.В. Клак

**МЕТОД ПОИСКА ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ**

Данная работа посвящена анализу известных подходов к поиску множества Парето-оптимальных решений многокритериальных оптимизационных задач. Определено, что основной проблемой таких способов является конечный выбор одной оптимальной точки на основе субъективного мнения эксперта. Существенным недостатком такого выбора является необходимость дополнительной информации, которая отсутствует в начальной постановке задачи оптимизации. Предложен усовершенствованный метод нахождения Парето-оптимальных решений многокритериальных оптимизационных задач на основе введения множества критериев качества, которые, в совокупности, позволяют без вмешательства экспертов определить лучший вектор решения. Проверена эффективность предложенного алгоритма на тестовом примере ранжирования кафедр МСФ Луцкого НТУ по заданному множеству критериев эффективности их работы.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальные решения, критерии оптимизации, вектор многомерного пространства, множество критериев качества.

L. Hromko, S. Pustiulha, U. Klak

**METHOD OF PARETO-OPTIMAL SEARCH THE SOLUTION OF MULTICRITERIA
OPTIMIZATION PROBLEMS**

This work is devoted to the analysis of known approaches to searching the set of Pareto-optimal solutions of multicriteria optimization problems. It is determined that the main problem of these methods is the final choice of one optimal end point based on the subjective opinion of an expert. A significant disadvantage of this choice is the need of additional information that is not present in the initial formulation of the optimization problem. It is proposed an improved method for finding Pareto-optimal solutions of multicriteria optimization problems by introducing a set of quality criteria which, taken together, allow to determine the best solution vector without the intervention of experts. It is tested the effectiveness of the proposed algorithm on a test example of ranking the departments of Lutsk NTU by many given criteria of their work effectiveness.

Keywords: multicriteria optimization, Pareto-optimal solutions, optimization criteria, the vector of the multidimensional space, the set of quality criteria.

Постановка задачі. Ефективність застосування сучасних інформаційних технологій, при розв'язанні практичних задач, значною мірою зводиться до ефективного застосування методів багатокритеріальної оптимізації. У теорії багатокритеріальної оптимізації, перш за все, вирішуються завдання прийняття рішень, одночасно за певною множиною критеріїв.

З математичної точки зору, задача оптимізації ставиться таким чином, що потрібно знайти числа $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, для яких функції

$$u_k = f_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \text{ при } k = 1, 2, 3, \dots, K \quad (1)$$

досягають оптимальних (максимальних чи мінімальних) значень, з урахуванням визначеної системи обмежень

$$g_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

Множина точок $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, що задовольняє системі (1)-(2), утворює допустиму область $D \subset R^n$. Елементи множини $D \subset R^n$ називаються допустимими розв'язками або альтернативами, а числові функції $f_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ - цільовими функціями, або критеріями, заданими на множині D . У формулюванні такої задачі присутні K цільових функцій. Ці функції відображають множину $D \subset R^n$ у множину $V \subset R^K$, яка називається множиною досяжності.

У векторній формі математичну модель багатокритеріальної оптимізації (1)-(2) можна записати наступним чином:

$$\vec{f}(X) = (f_1(X), \dots, f_K(X)) \rightarrow opt, \text{ при } X \in D \quad (3)$$

де $\vec{f}(X)$ - вектор-функція аргументу.

Вперше проблема багатокритеріальної оптимізації (БО) виникла у італійського вченого В. Парето при математичному дослідженні економічних процесів. Надалі інтерес до проблеми БО посилювався у зв'язку із розробкою і використанням сучасної обчислювальної техніки. А на сучасному етапі розвитку науки стало зрозумілим, що багатокритеріальні задачі широко присутні також і в техніці, наприклад, при проектуванні будь-яких складних технічних систем. Тому удосконалення та розвиток методів розв'язання багатокритеріальних задач є досить актуальними.

Аналіз останніх досліджень. В існуючих наукових джерелах що до рішення багатокритеріальних оптимізаційних задач відмічається, що на відміну від завдань оптимізації з одним критерієм у БО є невизначеність цілей. Дійсно, існування розв'язку, максимізуючого множину цільових функцій, є рідкісним винятком, тому з математичної точки зору задачі БО є невизначеними і розв'язком їх може бути тільки компромісне рішення [1]. Наприклад, при купівлі власного автомобіля із максимальними критеріями якості дизайну, комфорту, безпеки і мінімальними витратами на його придбання, очевидна неможливість досягнення всіх цілей одночасно, тому що чим більші вимоги до якості першої групи критеріїв, тим більшою має бути і ціна авто.

Якщо множина заданих функцій досягає оптимуму в одній і тій же точці, то кажуть, що задача має "ідеальний розв'язок". Випадки ж існування "ідеального розв'язку" в багатокритеріальних задачах вкрай рідкісні. Тому основна проблема при рішенні задач БО - формалізація принципу оптимальності, тобто визначення того, у якому сенсі знайдений оптимальний розв'язок кращий за інші. У разі відсутності "ідеального розв'язку" в задачі БО шукається компромісне рішення. Для всякої альтернативи $X \in D$ вектор із значень цільових функцій $(f_1(X), f_2(X), \dots, f_K(X))$ є векторною оцінкою альтернативи. Векторна оцінка альтернативи містить, як правило, повну інформацію про оптимальність цієї альтернативи для особи, яка приймає рішення (ОПР). Порівняння будь-яких двох можливих результатів замінюється порівнянням їх векторних оцінок [2,3].

Якщо для всіх критеріїв f_1, f_2, \dots, f_K є два вектора розв'язків X_1, X_2 і мають місце нерівності $f_k(X_2) \geq f_k(X_1)$, то кажуть, що вектор X_2 є кращим за X_1 . Тому, у задачах багатокритеріальної оптимізації точка X_s називається оптимальною за Парето, якщо не існує іншої точки X , яка була б краща, ніж X_s на заданій множині $X \in D$. Точки, оптимальні за Парето, утворюють множину точок, які не можна, в сенсі поставленої задачі, вже покращити. Оптимальні рішення багатокритеріальної задачі слід шукати лише серед елементів множини можливих альтернатив. У цій області жоден критерій не може бути покращений без погіршення хоча б одного з інших.

Як правило, розв'язок багатокритеріальної задачі полягає в побудові множини Парето-оптимальних точок із якої потім вибирається одна на основі певних міркувань експерта. Тому, одним із основних недоліків такого визначення оптимуму є проблема вибору потрібної точки. Щоб уникнути цієї проблеми часто намагаються звести багатокритеріальну задачу до однокритеріальної, для чого, зазвичай, використовується деяка додаткова інформація, яка відсутня в початковій постановці завдання [1,4,5]. Прикладами такого роду підходів можуть служити впорядкування критеріїв по їх значимості або перехід до "суперкритерію", який є сумою зважених критеріїв початкової постановки задачі.

У роботах [6,7,8,9,10] запропоновано інший підхід, який дозволяє отримувати Парето-

оптимальні рішення багатокритеріальної задачі без додаткових умов, що накладаються на початкову постановку самого завдання. У такому підході рішення будь-якої багатокритеріальної задачі інтерпретувалося, як задача оптимального упорядкування всіх її можливих розв'язків. При цьому, у просторі критеріїв оцінювалася монотонна зміна відстаней допустимих значень вектору змінних до найкращих і найгірших точок, а міра близькості або віддаленості до еталонних ставала визначальною для розв'язку. Однак, вибрана кількість критеріїв якості рішення БО у наведених роботах, на наш погляд, не дає повної відповіді про найкращий розв'язок задачі без втручання експертів.

Мета роботи. Метою роботи є удосконалення методу знаходження Парето-оптимальних рішень багатокритеріальних оптимізаційних задач на основі введення множини критеріїв якості, що у сукупності дозволяють, без втручання експертів, визначити найкращий вектор розв'язку.

Основна частина. Нехай формальна постановка задачі багатокритеріальної оптимізації задана наступним чином:

$$\begin{cases} \bar{u}_k = \bar{f}_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow \max \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases}, \quad (4)$$

де $\bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ - вектор змінних,

$f_k(\bar{X}) - k$ - критерій,

$g_i(\bar{X}) - i$ - обмеження.

Розв'язок такої багатокритеріальної задачі шукається у n - вимірному просторі. Для того, щоб вектор розв'язку $\bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ знаходився в одиничному гіперкубі нормуємо значення цільових функцій до безрозмірних величин із діапазону від 0 до 1, використовуючи наступний вираз:

$$\bar{f}_k^n(x_n) = \frac{\bar{f}_k(x_n) - \min f_k}{\max f_k - \min f_k}. \quad (5)$$

При відсутності обмежень виду $\bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i$, радіус-вектор з координатами $\bar{r}_{\max} = (1, 1, 1, \dots, 1)$ n - вимірного одиничного гіперкуба буде найкращим розв'язком задачі (4) (рис. 1). Довжина такого вектора визначається:

$$|r_{\max}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n 1}. \quad (6)$$

Ця довжина є своєрідним мірилом якості вектору розв'язків системи (4). Зведемо поставлену багатокритеріальну задачу до множини однокритеріальних задач, замінивши (4) наступними системами:

1. Довжина вектора $\bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ повинна прагнути до максимуму.

$$\begin{cases} |r_k| \rightarrow \max \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases}. \quad (7)$$

2. Відношення довжини вектора-мірила до довжини вектора розв'язків повинно бути мінімальним.

$$\begin{cases} \frac{|r_{\max}|}{|r_k|} \rightarrow \min \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases}. \quad (8)$$

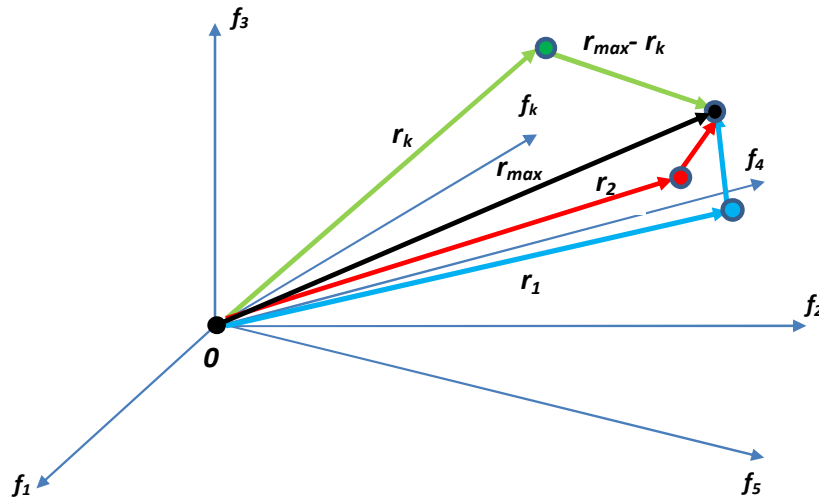


Рис. 1. Графічна інтерпретація пошуку вектора найбільш близького за характеристиками до вектора-мірила у багатовимірному просторі

3. Відношення довжини вектора-мірила до відстані між векторами r_{\max} і r_k - прагне до максимуму.

$$\begin{cases} \frac{|r_{\max}|}{|r_{\max} - r_k|} \rightarrow \max \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases} \quad (9)$$

4. Відношення відстані між векторами r_{\max} і r_k до довжини вектору розв'язків повинно бути мінімальним.

$$\begin{cases} \frac{|r_{\max} - r_k|}{|r_k|} \rightarrow \min \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases} \quad (10)$$

5. Скалярний добуток векторів r_{\max} і r_k повинен бути мінімальним.

$$\begin{cases} \frac{r_{\max} \times r_k}{|r_{\max}| \times |r_k|} \rightarrow \min \\ \bar{g}_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b_i \\ \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases} \quad (11)$$

Кожна із систем (7)-(11) має наступну властивість. Оптимальний вектор розв'язання кожної із систем (7), (8), (9), (10), (11) дасть оптимальний по Парето вектор рішення задачі (4). А сукупність розв'язків систем дасть Парето-оптимальний вектор рішення багатокритеріальної задачі (4) за множиною однокритеріальних задач (7)-(11). Графічно така властивість інтерпретується як пошук вектора найбільш близького за 5 якісними характеристиками до вектора-мірила $\vec{r}_{\max} = (1, 1, 1, \dots, 1)$ (рис. 1).

Для перевірки запропонованої методики розв'язання багатокритеріальних задач спробуємо оцінити роботу колективів 6 кафедр МБФ Луцького НТУ за 7 критеріями, які є базовими для

Міністерства освіти і науки України при визначенні рейтингів роботи ВНЗ за рік. Довжина вектора-мірила у семивимірному просторі відповідно (6) - $|r_{\max}| = 2.646$.

Критерії:

1. Якість кадрового потенціалу кафедри.
2. Кількість штатних докторів наук.
3. Середня кількість наукових публікацій на 1 викладача кафедри.
4. Середня кількість наукових публікацій у виданнях, що входять до науково-метричної бази Scopus на 1 викладача кафедри.
5. Середня кількість винаходів на 1 викладача кафедри.
6. Кількість фінансових поступлень по госпдоговірній тематиці на 1 викладача кафедри.
7. Кількість перемог студентів у Всеукраїнських олімпіадах і конкурсах наукових робіт на 1 викладача.

Показники роботи 6 кафедр МБФ наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

N кафедри МБФ	Кількість виділених ставок	Кількість працюючих викладачів	Кількість штатних докторів	Кількість наукових публікацій	Кількість наукових публікацій у базах Scopus	Кількість винаходів в та поданих заявок	Кількість фінансових поступлень по госпдоговірній тематиці 77грн.	Кількість перемог у олімпіадах і конкурсах
1-ІКГ	5.4	6	1	10	0	1	3800	2
2-АТТ	21	23	-	57	1	5	19250	3
3-ІКЗ	10.3	12	-	38	3	9	15100	1
4-ОПВ	7	7	-	19	1	7	3000	0
5-МЛП	10.01	13	-	10	0	0	3000	1
6-ОЛК	8.8	8	1	24	0	3	7000	1

Відповідно до показників розраховані значення вибраних критеріїв (таблиця 2).

Таблиця 2

N кафедри МБФ	Якість кадрового потенціалу	Кількість штатних докторів	Середня кількість публікацій на 1 викладача	Середня кількість публікацій у Scopus на 1 викладача	Середня кількість винаходів на 1 викладача	Кількість фінансових поступлень по госпдоговірній тематиці на 1 викладача грн.	Кількість перемог у олімпіадах і конкурсах на 1 викладача
1	67%	1	1.85	0	0.185	703.7	0.37
2	91%	-	2.71	0.05	0.24	916.7	0.14
3	100%	-	3.69	0.29	0.87	1466	0.1
4	100%	-	2.71	0.14	1	428.6	0
5	92%	-	1	0	0	300	0.1
6	87.5%	1	2.73	0	0.34	795.5	0.11

За виразом (5) нормуємо показники для 7-вимірного простору критеріїв (таблиця 3).

Отже, по всім критеріям якості у запропонованому методі та даних таблиці 4 сумарний рейтинг кафедр факультету вибудовується наступним чином: Р (3, 6, 4, 1, 2, 5). Аналізуючи результати роботи кафедр за окремими критеріями якості можна оцінити за рахунок яких величини показників або їх комплексу кафедра посіла відповідне місце у загальному рейтингу.

Таблиця 3

N кафедри МБФ	Якість кадрового потенціалу Норм.	Кількість штатних докторів в Норм.	Середня кількість публікацій на 1 викладача Норм.	Середня кількість публікацій у Scopus на 1 викладача Норм.	Середня кількість винаходів на 1 викладача Норм.	Кількість фінансових поступлень по госпдоговірній тематиці на 1 викладача Норм.	Кількість перемог у олімпіадах і конкурсах на 1 викладача Норм.
1	0	1	0.32	0	0.185	0.35	1
2	0.73	0	0.64	0.17	0.22	0.53	0.38
3	1	0	1	1	0.7	1	0.27
4	1	0	0.64	0.48	1	0.11	0
5	0.76	0	0	0	0	0	0.27
6	0.62	1	0.643	0	0.38	0.43	0.3

В результаті застосування систем (7)-(11) отримуємо наступні результати ранжування кафедр факультету.

Таблиця 4

N кафедри	r_k	Місце	$\frac{ r_{\max} }{ r_k }$	Місце	$\frac{ r_{\max} }{ r_{\max} - r_k }$	Місце	$\frac{ r_{\max} - r_k }{ r_k }$	Місце	$\frac{r_{\max} \times r_k}{ r_{\max} \times r_k }$	Місце	Сума місць	Рейтинг
	max		min		max		min		min			
1	1.503	3	1.76	3	1.404	5	1.253	4	0.77	5	20	4
2	1.202	5	2.201	5	1.5	3	1.466	5	0.575	3	21	5
3	2.136	1	1.239	1	2.07	1	0.6	1	0.496	1	5	1
4	1.629	2	1.625	2	1.48	4	1.1	3	0.723	4	15	3
5	0.807	6	3.128	6	1.12	6	2.929	6	1.067	6	30	6
6	1.572	2	1.777	4	1.68	2	1.06	2	0.543	2	12	2

Висновок.

У даній роботі проаналізовані відомі підходи до пошуку множини Парето-оптимальних розв'язків багатокритеріальних оптимізаційних задач. Визначено, що основною проблемою таких способів є кінцевий вибір однієї оптимальної точки на основі певних міркувань експерта, причому для цього необхідна додаткова інформація, що відсутня у початковій постановці задачі оптимізації. Запропоновано удосконалений метод знаходження Парето-оптимальних рішень багатокритеріальних оптимізаційних задач на основі введення множини критеріїв якості, які, у сукупності, дозволяють, без втручання експертів визначити найкращий вектор розв'язку. Перевірено ефективність запропонованого алгоритму на тестовому прикладі ранжування кафедр МБФ Луцького НТУ за заданою множиною критеріїв ефективності їх роботи.

1. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука. - 1982. - 254 с.
2. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. -М.:Наука, 1980.
3. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. - М.: Наука, 1982.
4. Жилинскас А.Г. Глобальная оптимизация. Вильнюс, 1986.
5. Будаева А.А. Применение таксономии для групповой оценки объектов (альтернатив) //Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования: Материалы V Международной конференции. Владикавказ: Изд-во «Терек», 2004. С. 563-565.
6. Гроппен В.О. Принципы оптимизации программного обеспечения ЭВМ. //Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета. 1993.
7. Гроппен В.О. Новые технологии принятия решений, их развитие и применение. Труды Международной научно-технической конференции "Информационные технологии и системы: новые информационные технологии в науке, образовании, экономике", Владикавказ, 2003 г. Т. 1, стр. 60-61.
8. Гроппен В.О. Основы теории принятия решений. СКГМИ, Изд. "Терек", 2004. 106 с.
9. Гроппен В.О. Принципы принятия решений с помощью эталонов.// РАН, ж. Автоматика и телемеханика, № 4, 2006. С. 167-184.
10. Гроппен В.О. Принципы решения многокритериальных задач с помощью эталонов. Труды XII Всероссийской научно-методической конференции. Телематика, Санкт-Петербург, 6-9 июня 2005. Т. 1. С. 125-128.

УДК 006.072.025:658.563

В. О. Залога, Ю. О. Денисенко, О. В. Івченко, О. Д. Динник*Сумський державний університет, Суми, Україна***НОРМАЛІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН**

В цій статті запропонований підхід до оцінки неоднорідних техніко-економічних показників інформаційної системи управління якістю інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства, який базується на застосуванні теорії нечітких множин.

Ключові слова: техніко-економічні показники, нормалізація, шкала, інструментальне виробництво.

Рис. 5. Табл. 2. Літ. 9.

В. А. Залога, Ю. А. Денисенко, А. В. Івченко, О. Д. Динник**НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

В этой статье предложен подход к оценке неоднородных технико-экономических показателей информационной системы управления качеством инструментальной подготовки производства машиностроительного предприятия, основанный на применении теории нечетких множеств.

Ключевые слова: технико-экономические показатели, нормализация, шкала, инструментальное производство.

V. O. Zaloga, Y.O. Denysenko, O. V. Ivchenko, O. D. Dunnyk**NORMALIZATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF TOOL PRODUCTION THROUGH THE APPLICATION OF FUZZY SETS THEORY**

In this article, proposed an approach to the evaluation of heterogeneous technical and economic indicators of information quality management system instrumental pre-production engineering company, which is based on application of fuzzy sets.

Keywords: technical and economic parameters, normalization, scale, tool production.

Вступ. В наш час однією з умов забезпечення конкурентоспроможності сучасного машинобудівного підприємства є підвищення якості процесів, пов'язаних із забезпеченням виробництва необхідними інструментами та оснащенням. Слід зазначити, що, не дивлячись на те, що на сьогоднішній день є досить багато спеціалізованих виробництв, які виробляють значну номенклатуру інструментів й оснащення, все ж однією з невід'ємних частин сучасного машинобудівного підприємства є своє інструментальне виробництво. Відомо [1, 2], що перебіг процесів життєвих циклів інструментів й оснащення, а також ступінь управління їх якістю, які в значній мірі залежать від рівня інструментальної підготовки основного виробництва, суттєво впливають на витрати при виготовленні відповідної продукції. Таким чином, інструменти та оснащення є одними з найважливіших елементів машинобудівного виробництва, які в значній мірі визначають рівні діючих (реальних, дійсних) технологічних процесів, а, відповідно й якість продукції, продуктивність праці та собівартість продукції. Саме ці показники, які є одними із основних техніко-економічних показників (ТЕП) любого машинобудівного підприємства, обумовлюють конкурентоспроможність виготовленої на ньому продукції. Тому вирішення проблеми підвищення якості інструментальної підготовки виробництва (ІПВ) для вітчизняних машинобудівних підприємств є задачею актуальною та своєчасною. Слід відзначити, що успішному вирішенню цієї важливої для підприємства задачі в значній мірі може сприяти ефективне використання сучасних інформаційних технологій (ІТ).

Метою роботи є підвищення якості інструментальної підготовки виробництва шляхом розроблення єдиної нормалізованої шкали оцінювання техніко-економічних показників (ТЕП) системи ІПВ на основі використання сучасних інформаційних технологій.

1 Система техніко-економічних показників інструментальної підготовки виробництва

Одним із ефективних шляхів вирішення поставленої проблеми є використання в системі управління діяльністю машинобудівного підприємства інформаційної системи (ІС) ІПВ, що спирається на використання результатів аналізу даних системи ТЕП та методів їх оцінювання.

В роботі [3] запропонована система ТЕП ІПВ, яка використовується для раціоналізації діяльності машинобудівного підприємства як на оперативному, так і на тактичному рівнях, з метою мінімізації витрат на ІПВ або пошуку технології реалізації відповідних процесів інструментального забезпечення в найкоротші терміни. У цій системі ТЕП розподілені за трьома

рівнями ієрархії: за рівнем управління – оперативний і тактичний; за видами діяльності – організаційно-економічні, виробничі, управління якістю, екологічні, соціальні; за відповідним результуючим значенням – показники, які обраховуються за відносною шкалою від 0 до 1; показники, які мають оптимальне абсолютне значення; показники, які визначаються згідно логічних суджень експертів.

Проведений аналіз показав, що в запропонованій системі ТЕП ІПВ практично відсутній єдиний підхід до розрахунку та представлення ТЕП, що суттєво ускладнює використання сучасних інформаційних технологій і знижує ефективність більшості процесів ІПВ, тому що оцінки ТЕП в ній для різних процесів визначаються різними методами, можуть мати різну розмірність тощо. Так, наприклад, до першої класифікаційної групи ТЕП у цій системі відносяться показники, значення яких є відносними і лежить в інтервалі [0-1] з максимальними значеннями, що прагнуть до 1 (max→1). До наступної групи відносяться ТЕП, значення яких знаходяться в межах конкретного діапазону відповідним чином визначених або регламентованих відповідною нормативною документацією (НД) абсолютних (чисельних) значень тих чи інших показників. До третьої групи належать показники, які визначаються за допомогою експертних методів і мають, як правило, логічні оцінки. Така диспозиція значень різних ТЕП в умовах використання сучасних інформаційних технологій не завжди дозволяє оцінювати їхню порівнювальну значимість для забезпечення успішної за всіма показниками діяльності підприємства або його окремих підрозділів (складових) та приймати найкращі (оптимальні, раціональні) управлінські рішення як на оперативному, так і стратегічному рівнях.

Отже, з метою підвищення ефективності процедури прийняття в достатній мірі обґрунтованих раціональних рішень щодо перебігу процесів в системі ІПВ на основі аналізу ТЕП з використанням сучасних ІТ, необхідне приведення їх значень до якоїсь єдиної (нормалізованої) шкали оцінювання.

2 Розроблення єдиної шкали нормалізації ТЕП

Єдину шкалу нормалізації ТЕП системи ІПВ запропоновано розробляти на основі застосування теорії нечітких множин. Методика застосування математичного апарату теорії нечітких множин передбачає [4, 5, 6 й ін.] такі основні етапи:

- виділення параметрів, які характеризують досліджувану систему; визначення і формалізація лінгвістичних оцінок параметрів (фазифікація);
- побудова нечіткої бази знань про взаємозв'язки між параметрами;
- реалізація нечіткого логічного висновку про вплив вхідних параметрів на вихідні фактори;
- перетворення нечіткого логічного рішення в чітке значення (дефазифікація).

Відомо, що у теперішній час найбільш використовуваними в якості базового лінгвістичного значення оцінок ТЕП ІПВ для їх нормалізації є чисельні 5 – 7 бальні шкали оцінювання [1]. Так, наприклад, шкала Харрінгтона [7] при прийнятті багатьох рішень дозволяє оцінювати будь-який показник за його наступними рівнями: якщо дуже добре, то 1; добре – 2; задовільно – 3; погано – 4; дуже погано – 5. Зрозуміло, що така цілочисельна (від 1 до 5) оцінка ТЕП є нечіткою і дуже розмитою, що робить її в цьому випадку дуже залежною від суб'єктивних факторів, наприклад, судження, сприйняття та емоційного стану того суб'єкту, який приймає рішення. У зв'язку з цим, на наш погляд, більш доцільним є використання при оцінці ТЕП не цілочисельних змінних у вказаному діапазоні, а відповідних ним лінгвістичних, тобто таких, значеннями яких є не запропоновані цілі числа, а слова і словосполучення в природній або формальній мові [4]. Наприклад, можна запропонувати *лінгвістичну змінну* з назвою «ТЕП». *Значення* цієї лінгвістичної змінної, на відміну від самої змінної, будемо називати «Рівень ТЕП». Відповідно до цього можна записати рівняння призначення у вигляді:

$$X = \text{назва в } T(X), \quad (1)$$

де X – терм (формальне ім'я об'єкту), який характеризує рівень відповідного ТЕП; $T(X)$ – терм-множина, у якій терми можуть приймати відповідні їм значення.

Наприклад, якщо терм, в терм-множині $T(X)$ приймає значення «дуже добре», тоді можна написати:

$$\text{Рівень ТЕП} = \text{дуже добре} \quad (2)$$

де «дуже добре» – значення лінгвістичної змінної, яка має назву «дуже добре», прийняте цією змінною, та представляє собою обмеження на значення деякої базової змінної U в універсальній множині, наприклад, типу $U = [0,1]$.

У відповідності з таким підходом лінгвістичну змінну «Рівень ТЕП» можна представити деякою базовою змінною u , яка являє собою чисельну змінну, що може приймати любе значення, наприклад, у вказаній множині $U = [0,1]$ у діапазоні від 0 до 1, наприклад, 0; 0,1; 0,2; ... або 1,0. Таким чином, множина U являє собою якусь відносну базову шкалу оцінок, за допомогою якої можна проводити вимірювання (нормалізацію, оцінювання, визначення) рівня відповідного ТЕП, незалежно від його розмірності, методу визначення тощо.

Для проведення процедури оцінювання рівня ТЕП з використанням запропонованої шкали необхідно спочатку визначити назви лінгвістичних змінних "ТЕП", а потім відповідні значення, які вони можуть приймати, тобто скласти терм-множину $T(X)$, для чого треба сформулювати терми, що входять в нього, у відповідності з синтаксичними правилами, прийнятими у теорії нечітких множин [4].

Логічно буде припустити, що створювана терм-множина повинна містити в собі також терми – добре, погано і задовільно. При цьому будемо вважати, що, наприклад, деяка нечітка підмножина $M(X_1)$, відповідна до значення лінгвістичної змінної з назвою погано, не є доповненням до нечіткої підмножини $M(X_1)$, відповідної до значення лінгвістичної змінної з назвою добре, тобто:

$$M(\text{добре}) \neq \overline{M(\text{погано})} \quad (3)$$

де – знак $\overline{\quad}$ означає операцію доповнення до нечіткої підмножини.

Таким чином, будемо вважати, що терм-множина $T(\text{ТЕП})$ змінної "ТЕП" містить у собі наступні терми:

$$T(\text{ТЕП}) = \text{дуже добре} + \text{добре} + \text{задовільно} + \text{погано} + \text{дуже погано}.$$

У цьому виразі терми «дуже добре» і «дуже погано» є складеними термами, тобто складаються з, так званих, атомарних термів [4]: «добре», «погано».

Вказана терм-множина $T(\text{ТЕП})$ відповідає [5] критеріям, що враховують усі особливості сприйняття суб'єктом (оцінювачем, експертом) відповідних реальних об'єктів і їх опису, зокрема:

при використанні даної множини значень суб'єкт буде при описі свого «бачення» рівня відповідного ТЕП при його оцінюванні за тими або іншими критеріями зазнавати мінімальну невизначеність;

при використанні даної множини значень у випадку оцінки задоволеності експертним шляхом буде спостерігатися мінімальний ступінь неузгодженості думок різних експертів.

Розглянемо варіант синтаксичного правила для складання терма «дуже добре» із терм-множини $T(\text{ТЕП})$.

Складений терм «дуже добре» може бути описаний граматикою типу:

$$R = (V_T, V_N, T, P) \quad (4)$$

де V_T – множина термінальних символів (компоненти термів в T), наприклад, $V_T = \text{дуже} + \text{добре}$; V_N – множина не термінальних символів (синтаксичних категорій), наприклад, $V_N = T + A$, де A – прийняте значення атомарного терму (терм, який складається з одного слова або з декількох слів, завжди фігурують разом один з одним [4]); P – система підстановок.

Прийmemo до уваги те, що в теорії нечітких множин знак $+$ означає операцію об'єднання термінальних символів.

Система підстановок P може мати вигляд:

$$\begin{aligned} T &\rightarrow A, \\ T &\rightarrow \text{дуже } A, \\ A &\rightarrow \text{добре} \end{aligned}$$

Тоді ланцюжок підстановок для терма R у (4) прийме вигляд:

$$T \rightarrow A \rightarrow \text{дуже } A \rightarrow \text{дуже добре}. \quad (5)$$

Аналогічним способом визначаються ланцюжки підстановок для всіх інших термів, що входять у терм-множину $T(\text{ТЕП})$.

Функції належності. Наступним не менш важливим завданням, є побудова функцій належностей для кожної нечіткої підмножини, що характеризує певне значення лінгвістичної змінної. У даному випадку тип функції належності для кожної нечіткої підмножини будемо

визначати експертним методом, а самі значення μ_i розраховувати по формулах, відповідних до конкретного виду функції.

Прийmemo наступні значення нечітких підмножин для ТЕП першої групи: відносні показники, значення яких лежить в інтервалі [0-1], а їх максимальні значення прагнуть до 1, тобто $\max \rightarrow 1$.

1. Функцію належності для нечіткої множини $M(\text{добре})$ можна описати, наприклад, формулами типу [4]:

$$\mu_{ny}(u, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } u \leq \gamma; \\ 1 - \frac{2(u - \gamma)^2}{(\alpha - \gamma)^2}, \text{ якщо } \gamma \leq u \leq \beta; \\ \frac{2(u - \alpha)^2}{(\alpha - \gamma)^2}, \text{ якщо } \beta \leq u \leq \alpha; \\ 0, \text{ якщо } u \geq \alpha; \end{cases} \quad (6)$$

де α , γ , β – числові параметри, що приймають довільні дійсні значення.

Встановивши експертним шляхом значення числових параметрів $\alpha = 0,5$; $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,36$ і, провівши відповідні розрахунки за формулами (6), одержимо наступний вигляд функції належності для різних значень базової змінної u (рис. 1,а):

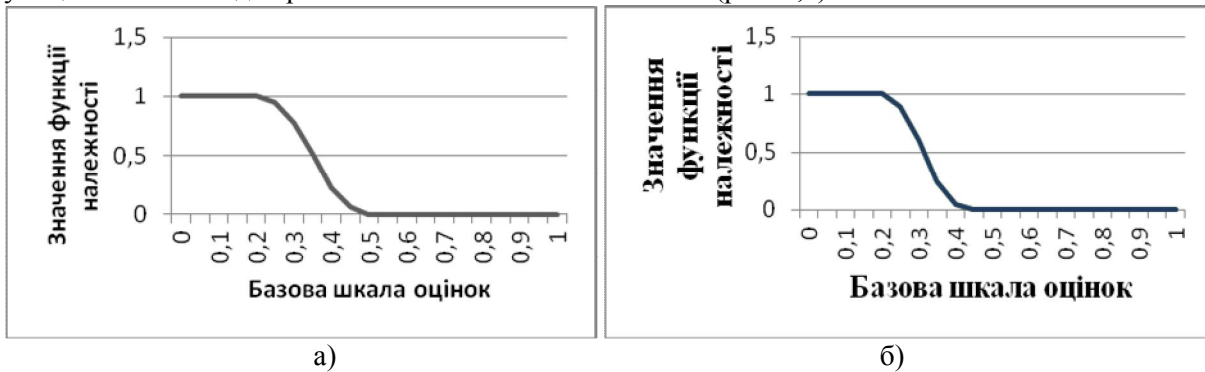


Рис. 1 Вигляд функцій належності для підмножин: а) «добре», б) «дуже добре»

2. Для встановлення вигляду функції належності для нечіткої множини $M(\text{дуже добре})$ прийmemo припущення, що модифікатор «дуже» діє як оператор підвищення «чіткості» нечіткої підмножини $M(\text{добре})$ у вигляді концентрування, тобто:

$$M(\text{дуже добре}) = \text{CON}(M(\text{добре})) = (M(\text{добре}))^2 \quad (7)$$

Таким чином, можна записати:

$$\mu_{AY} = \mu_Y^2. \quad (8)$$

Звідки одержимо функцію належності, показану на рис. 1, б.

3. Функцію належності для нечіткої множини $M(\text{погано})$ можна описати формулами типу [4]:

$$\mu_y(u, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } u \leq \alpha; \\ \frac{2(u - \alpha)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } \alpha \leq u \leq \beta; \\ 1 - \frac{2(u - \gamma)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } \beta \leq u \leq \gamma; \\ 1, \text{ якщо } u \geq \gamma; \end{cases} \quad (9)$$

де $\beta = (\alpha + \gamma)/2$ – точка переходу, тобто таке значення $u \in U$, ступінь належності множині $M(X)$ якого дорівнює 0,5.

Встановивши експертним шляхом значення числових параметрів $\alpha = 0,5$; $\gamma = 0,8$, $\beta = 0,65$ і, провівши розрахунки по формулах (9), одержимо вигляд функції належності для різних значень базової змінної u , представлений на рис. 2, а.

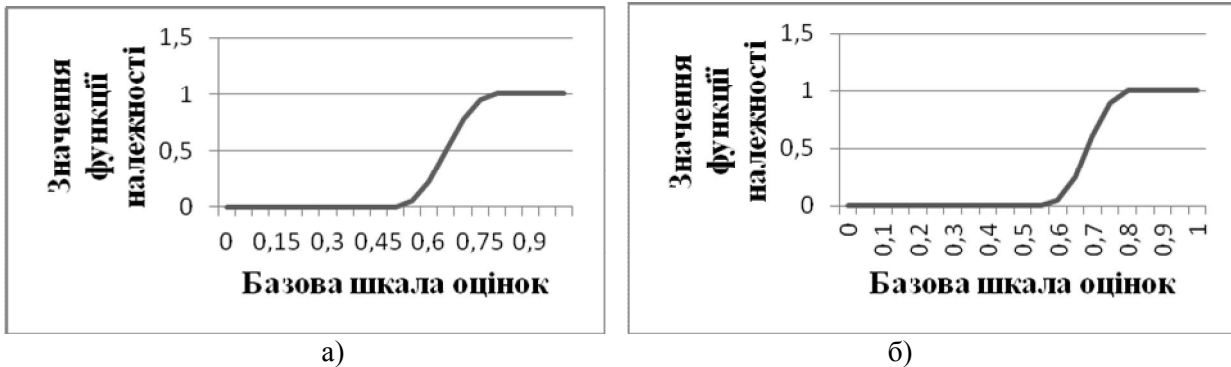


Рис. 2 Вигляд функцій належності для нечітких підмножин:
а) M «погано» та б) M «дуже погано»

4. Для встановлення вигляду функції належності нечіткій множині M (дуже погано) прийемо припущення, аналогічне припущенню для нечіткої множини M (дуже добре), тобто:

$$\mu_{AY} = \mu_Y^2 \tag{10}$$

Тоді одержимо функцію належності, показану на рис. 2, б.

5. Функція належності для нечіткої множини M (задовільно) описується формулами типу:

$$\mu_{\text{ч}} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } u \leq \alpha; \\ \frac{2(u - \alpha)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } \alpha \leq u \leq \beta; \\ 1 - \frac{2(u - \gamma)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } u \leq \gamma; \\ 1, \text{ якщо } u = \gamma; \\ 1 - \frac{2(u - \gamma)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } u \leq \delta; \\ \frac{2(u - \varepsilon)^2}{(\gamma - \alpha)^2}, \text{ якщо } \delta \leq u \leq \varepsilon; \\ 0, \text{ якщо } u \geq \varepsilon; \end{cases} \tag{11}$$

Встановивши експертним шляхом значення числових параметрів $\alpha = 0,15$; $\gamma = 0,5$; $\varepsilon = 0,85$, і враховуючи, що $\beta = (\alpha + \gamma) / 2$ та $\delta = (\varepsilon + \gamma) / 2$, одержимо вигляд функції належності для різних значень базової змінної u , показаний на рис.3.

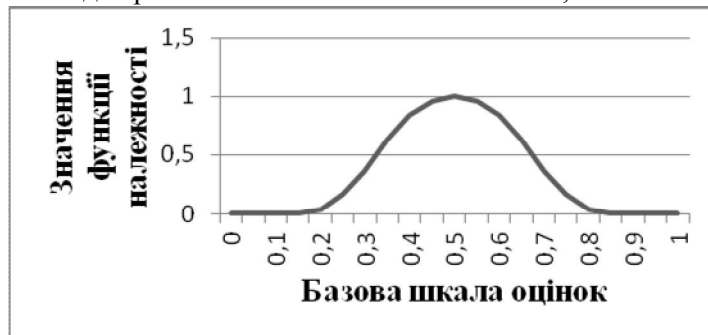


Рис. 3. Вид функції належності для нечіткої підмножини «Задовільно»

Побудувавши всі функції належності на одній площині, одержимо графічне зображення лінгвістичної змінної "ТЕП" (рис.4).

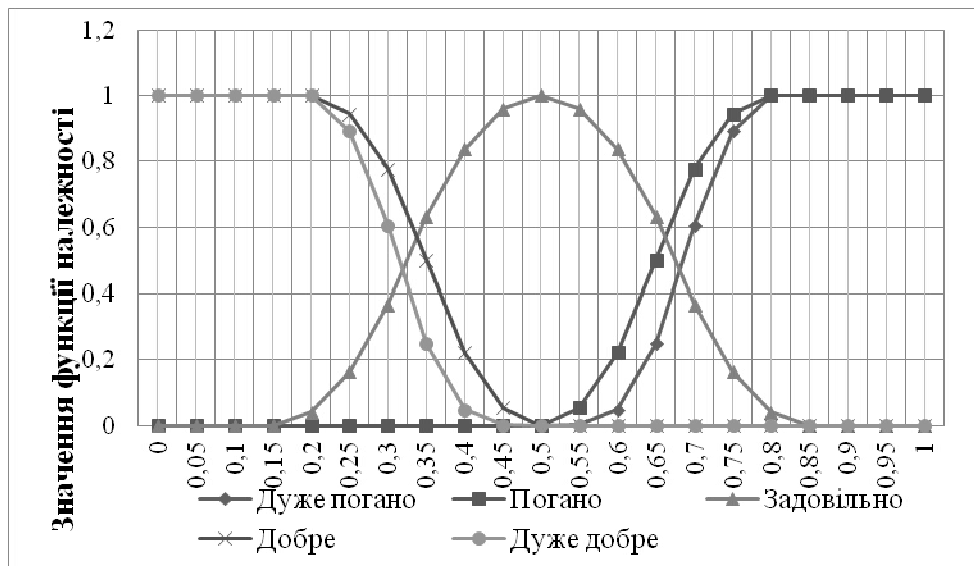


Рис. 4. Графічне зображення лінгвістичної змінної «ТЕП»

Як видно з наведеного графічного зображення, усі нечіткі підмножини, використувані для оцінки рівня ТЕП, є нормальними:

$$\max \{ \mu_A(u) \} = 1,$$

тобто для кожної підмножини можна знайти хоча б одне $u \in U$, для якого $\mu_A(u) = 1$.

Крім того, з рис. 4 видно, що крім точок, що лежать в інтервалах $[0; 0,2]$ і $[0,8; 1,0]$, немає жодної точки, для якої виконувалося б умова:

$$\max \{ \mu_A(u_i) \} = \max \{ \mu_B(u_i) \},$$

тобто, для будь-якої точки u можна знайти таку функцію належності, що:

$$\max \{ \mu_A(u_i) \} \geq \mu_{A_j}(u), 1 \leq j \leq 11, j \neq i.$$

Дефазифікація оцінки показників. Процедура дефазифікації аналогічна знаходженню характеристик положення (математичного очікування, моди, медіани) випадкових величин у теорії вірогідності. Згідно [8] цей етап не є обов'язковим. Він використовується тоді, коли необхідно перетворити нечіткий набір значень лінгвістичних змінних, що виводяться, до точних значень.

Отже згідно рисунку 6 для чисельного значення u , можна визначити по табл.1 відповідне йому лінгвістичне значення змінної «ТЕП».

Таблиця 1. Шкала нормалізації ТЕП процесів ІС ШВ

Значення ТЕП	Значення лінгвістичної змінної «ТЕП»	Бал
1	2	3
$0 \leq u \leq 0,2$	Дуже добре	1
$0,2 < u \leq 0,34$	Добре	2
$0,34 < u \leq 0,66$	Задовільно	3
$0,66 < u \leq 0,8$	Погано	4
$0,8 < u \leq 1$	Дуже погано	5

Аналогічним чином проводять побудову шкал оцінок для всіх ТЕП другої групи, які мають оптимальне або регламентоване нормативними документами абсолютне значення. На першому етапі визначається інтервал можливих значень конкретного ТЕП в рамках підприємства, що аналізується. На подальших етапах відбувається фазифікація, встановлення функцій належності та побудова графічних зображень лінгвістичної змінної за описаною методикою.

Наприклад, показник автоматизації інструментального виробництва – це відношення кількості верстатів автоматичної дії до загальної кількості верстатів. Враховуючи різноманітність технологічного оснащення, та вимоги до швидкості переналагодження обладнання для виготовлення та ремонту ТО, оптимальне значення показника автоматизації інструментального

виробництва у своїй переважній більшості не повинне перевищувати значення 0,7. Тому, шкалу нормалізації цього показника доцільно звести до вигляду, показаному в таблиці 2.

Таблиця 2 Шкала нормалізації показника автоматизації інструментального виробництва

Значення ТЕП	Значення лінгвістичної змінної «ТЕП»	Бал
1	2	3
$0 \leq u \leq 0,25$	Дуже погано	5
$0,25 < u \leq 0,38$	Погано	4
$0,38 < u \leq 0,7$	Дуже добре	1
$0,7 < u \leq 0,85$	Добре	2
$0,85 < u \leq 1$	Задовільно	3

ТЕП третьої групи визначаються згідно логічних суджень експертів. В цьому випадку відбувається бальне оцінювання показника за шкалою, представленою у таблиці 1 (стовпчики 2 та 3).

3. Розробка алгоритму застосування нормалізації ТЕП в ІС ПІВ

На рисунку 5 наведено алгоритм застосування запропонованого методу нормалізації техніко-економічних показників в ІС ПІВ машинобудівного підприємства.

В цьому алгоритмі згідно вимог конкретного технічного завдання на придбання або виготовлення технічного оснащення формується перелік ТЕП ІС ПІВ. Як вже зазначалося, перелік ТЕП формується з трьох класифікаційних груп, показники мають різну розмірність та оптимальні значення, тому, після визначення величини кожного ТЕП, на наступному кроці необхідно провести їх нормалізацію. Згідно з запропонованою методикою застосування теорії нечітких множин для кожної групи показників розробляється шкала нормалізації, за якою значення відповідного показника переводиться в безрозмірну величину – бал.

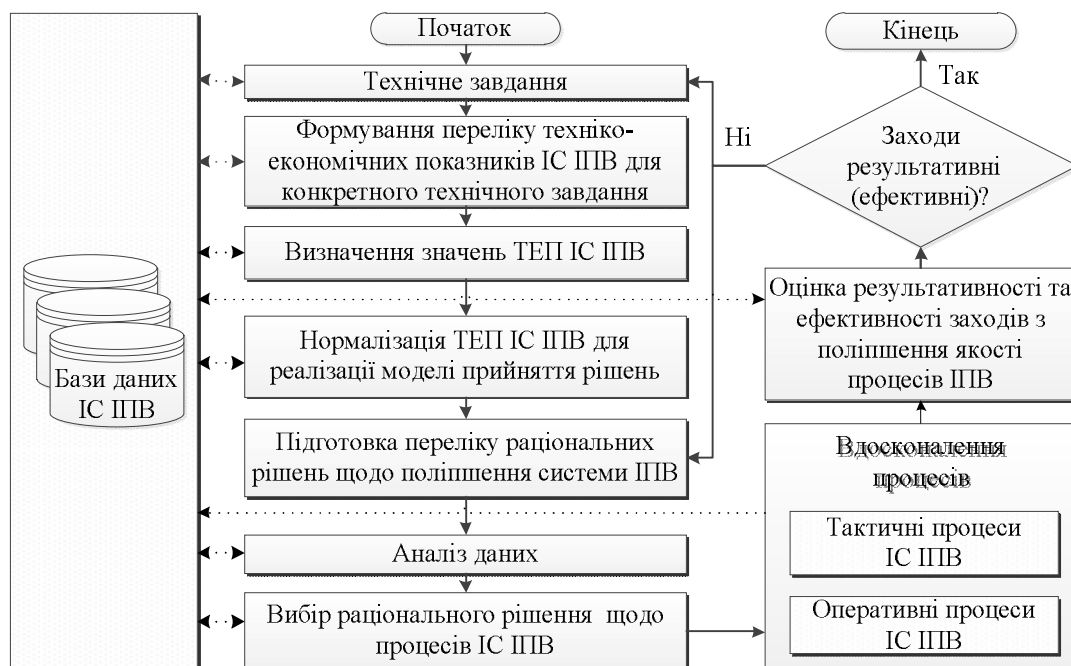


Рис. 5 Нормалізація техніко-економічних показників в інформаційній системі управління якістю інструментальної підготовки виробництва

Наступними кроками, шляхом підстановки нормалізованих ТЕП в математичну модель, яка запропонована в роботі [9], відбувається: формування переліку раціональних рішень щодо поліпшення системи ІС ПІВ, аналіз цих даних та вибір раціонального рішення.

На етапі вдосконалення процесів відбувається втілення запропонованого раціонального рішення в процеси ІС ПІВ. Алгоритм також враховує вимоги ДСТУ ISO 9001:2009 щодо оцінювання результативності та ефективності виконуваних заходів. Цей етап передбачає зворотній

зв'язок, який може зажадати корегування технічного завдання, переліку ТЕП ІС ПІВ або вибір альтернативного рішення.

Висновки

1. Показано, що у традиційно визнаних системах ТЕП ПІВ практично відсутній єдиний підхід до розрахунку та представлення ТЕП, що суттєво ускладнює використання сучасних інформаційних технологій і знижує ефективність більшості процесів ПІВ, тому що оцінки ТЕП в ній для різних процесів визначаються різними методами, можуть мати різну розмірність тощо. У зв'язку з цим, запропоновано ТЕП ПІВ машинобудівного підприємства розділити на три групи:

– перша група ТЕП – відносні показники, значення яких лежить в інтервалі [0-1], а максимальне значення прагне до 1 (max→1);

– друга група – ТЕП, значення яких знаходяться в межах конкретного діапазону і мають оптимальне абсолютне значення;

– третя група – ТЕП, які визначаються за допомогою експертних методів.

2. На основі застосування теорії нечітких множин розроблена універсальна шкала нормалізації неоднорідних ТЕП ПІВ, що дозволяє використовувати систему ТЕП ПІВ для підвищення ефективності діяльності машинобудівних підприємств шляхом використання сучасних ІТ та проведення оперативного аналізу результатів оцінювання техніко-економічного рівня системи ПІВ, а, відповідно, своєчасної зміни тактичних дій (процесів) в системі управління виробництвом.

3. Показано, що поєднання системи нечіткого виводу з інформаційною системою управління (ТЕП ІС ПІВ) дозволяє використовувати у єдиному інформаційному просторі як вихідні дані для нечіткого опису, так і результати візуалізації у вигляді діаграм та таблиць даних.

4. Наведені приклади розрахунку функцій належності як окремих нечітких підмножин лінгвістичних змінних, що використовуються для оцінки рівня ТЕП, «дуже добре», «добре», «задовільно», «погано», «дуже погано», так і лінгвістичної змінної «ТЕП» в цілому.

5. Розроблено алгоритм нормалізації ТЕП в ІС ПІВ машинобудівного підприємства.

1. Івченко, А.В. Управление качеством инструментальной подготовки производства многоименного машиностроительного предприятия [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.02 – Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение / А. В. Ивченко; КНУТД. – Сумы: СГУ, 2009. – 278 л.
2. Зеленцова, Е.В. Системный подход к инструментальному обеспечению предприятия [Электронный ресурс] / Зеленцова Е.В., Зеленцова Н.Ф. Режим доступа: http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal_24Theme1.shtml
3. Залога В.О. Оцінювання техніко-економічних показників інструментальної підготовки виробництва / В.О. Залога, О.В. Івченко, Ю.О. Погоржельська // XIV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція: Машинобудування України очима молодих – 2014 р., м.Суми. – С.33-35.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер с англ. Н.И.Ринго. – М: "Мир". – 1976. – 164 с.
5. Ротштейн О.П. Интеллектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О. П. Ротштейн. – Вінниця: Універсум-Вінниця. – 1999. – 320 с.
6. Дынник О.Д. Оценка удовлетворенности заинтересованных сторон. Часть 2. Разработка шкалы оценивания / О. Д. Дынник, В. А. Залога, А. В. Ивченко, Ю. А. Денисенко, Н. В. Сущенко // Журнал инженерных наук. – Сумы: Изд-во СумДУ, 2014. – №2. – С. Е 1–Е11.
7. Пичкалев А. В. Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля/А.В. Пичкалев // Вестник КГТУ. - Красноярск : КГТУ. – 1997. – С. 128–132.
8. Макеева А.В. Основы нечеткой логики. Учебное пособие для вузов / Макеева А.В. – Н. Новгород: ВГИПУ. – 2009. – 58 с.
9. Залога В.О. Модель прийняття рішень при управлінні якістю інструментальної підготовки виробництва. / Залога В.О., Погоржельська Ю.О., Івченко О.В. // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции. – Киев: АТМ Украины. – 2014. – 144 с. – 45-46 с.

Стаття надійшла до редакції 17.03.2015.

УДК514.182.7

А. В. Золотова
ДИСКРЕТНА ОДНОВИМІРНА КУСКОВА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ПРИ
КОМБІНОВАНОМУ РОЗПОДІЛІ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У статті розглянуто формування складеної дискретно визначеної кривої статико-геометричним методом під дією комбінованого навантаження, що складається з рівномірного та лінійно-розподіленого. Визначено умову гладкого стикування частин кривої в дискретному вигляді, що дозволяє виключити похибку дискретизації в околі точки стику.

Ключові слова: статико-геометричний метод, дискретно-визначена крива, похибка дискретизації, складена крива.

Рис. 6. Табл. 1. Літ. 5.

А. В. Золотова
ДИСКРЕТНАЯ ОДНОМЕРНАЯ КУСОЧНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ПРИ
КОМБИНИРОВАННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

В статье рассмотрено формирование составной дискретно определенной кривой статико-геометрическим методом под действием комбинированной нагрузки, состоящей из равномерной и линейно-распределенной. Определены условия гладкой стыковки частей кривой в дискретном виде, позволяющие исключить погрешность дискретизации в окрестности точки стыка.

Ключевые слова: статико-геометрический метод, дискретно определенная кривая, погрешность дискретизации, составная кривая.

A. V. Zolotova
DISCRETE ONE-DIMENSIONAL PIECEWISE INTERPOLATION WITH A COMBINED
EXTERNAL LOAD DISTRIBUTION

The article deals with the formation of a composite discrete specified by curve static geometric method under the combined load, consisting of uniform and discrete distributed. The conditions are determined, which makes possible to exclude the sampling error in the vicinity of the joint.

Keywords: static-geometric method, discrete defined curve, the sampling error, composite curve.

Постановка проблеми. Відомо, що при формуванні дискретно визначеної кривої (далі ДВК) під дією рівномірного зовнішнього навантаження, її вузли належать параболі другого порядку [1]. У випадку лінійного розподілу навантаження формується крива, вузли якої належать кубічній параболі [2]. При комбінованому навантаженні (рівномірному та лінійному) формується складена крива, вузли якої в околі точки стику не відповідають зазначеним неперервним аналогам. Ця розбіжність збільшується із збільшенням кроку дискретизації [3]. Виникає задача формування складеної дискретно визначеної кривої, вузли якої належать неперервному аналогу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] було розглянуто формування складених кривих статико-геометричним методом під дією рівномірно-кускового та лінійно-кускового зовнішнього навантаження, що має злам або перепад у точці стику. Було визначено скінченно-різницеві рівняння, що забезпечують виключення похибки дискретизації в околі лінії стику складених ДВК.

Формулювання цілей статті. Ціллю даної статті є розробка способу формування складеної кривої під дією комбінованого навантаження, яке складається з рівномірного та лінійно-розподіленого, з виключенням похибки дискретизації в околі лінії стику.

Основна частина. Аналітичний опис умов гладкого стикування кривих спрощується, якщо ці криві віднесено до локальної афінної координатної системи uSv , і це ніяк не впливає на результат у глобальному випадку, коли складену криву віднесено до глобальної координатної системи xOy . Тому у подальшому всі викладки надаються у локальній системі координат, початком якої є точка S стику кривих (рис.1).

До глобальної системи координат завжди можна перейти за формулами перетворення координат [1]:

$$x_i = x_s + u \cos \alpha - v \sin \alpha ; \quad (1)$$

$$y_i = y_s + u \sin \alpha + v \cos \alpha , \quad (2)$$

де x_s, y_s – координати точки S (точка відліку локальної системи координат),

α – кут між осями u та x .

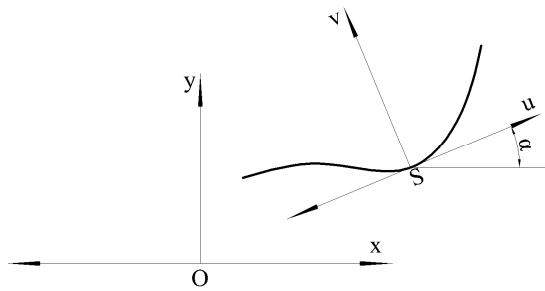


Рис.1. Глобальна xOy і локальна uSv системи координат

Якщо одна ділянка ДВК формується під дією рівномірного навантаження, а друга – лінійно розподіленого, то координати вузлів ДВК на цих ділянках відповідають кривим, що описуються рівняннями (3) і (4) (рис.2)

$$v_1 = a_1 u + a_2 u^2; \quad (3)$$

$$v_2 = b_1 u + b_2 u^2 + b_3 u^3. \quad (4)$$

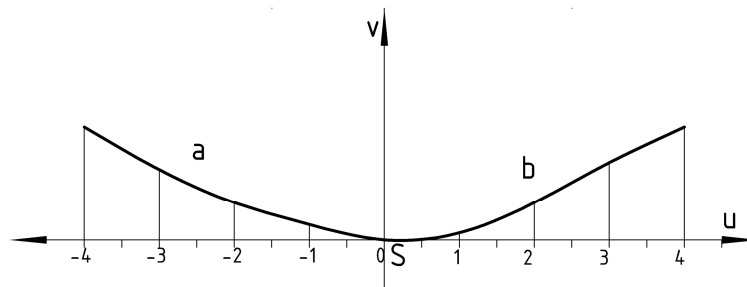


Рис.2. Складена крива

Умовою гладкого стикування кривих з першим порядком гладкості є рівність перших похідних від функцій кривих. Умова тотожності відповідних похідних виразів (3) і (4) забезпечується при тотожності їх вільних членів.

$$a_1 = b_1.$$

Тоді рівняння кубічної параболи (4) можна переписати у вигляді:

$$v_2 = a_1 u + b_2 u^2 + b_3 u^3. \quad (5)$$

Рівняння (3) і (5) в сумі мають чотири незалежних параметри. Підставляючи координати п'яти точок в околі точки O , отримуємо систему рівнянь (6)

$$\begin{aligned} v_{-2} &= -2a_1 + 4a_2; \\ v_{-1} &= -a_1 + a_2; \\ v_1 &= a_1 + b_2 + b; \\ v_2 &= 2a_1 + 4b_2 + 8b_3; \\ v_3 &= 3a_1 + 9b_2 + 27b_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Виключаючи параметри a_i і b_i з системи рівнянь (6), отримуємо залежність між координатами складеної ДВК при гладкому стикуванні з першим порядком гладкості

$$-3v_{-2} + 12v_{-1} + 18v_1 - 9v_2 + 2v_3 = 0. \tag{7}$$

При переході до глобальної системи координат [1] умова гладкого стику кривих (7) набуває вигляду

$$-3y_{-2} + 12y_{-1} - 20y_0 + 18y_1 - 9y_2 + 2y_3 = 0. \tag{8}$$

Рівняння (8) є умовою точного гладкого стикування (з першим порядком гладкості) двох ДВК, одна з яких формується під дією рівномірного навантаження, а друга – лінійно-розподіленого.

Приклад 2.4. Задано дві криві a і b (рис. 3). Крива a проходить через точки D(-4; 3), C(-2; 1) і O(0; 0), крива b - через O(0; 0), A(2; 1) і B(4; 3).

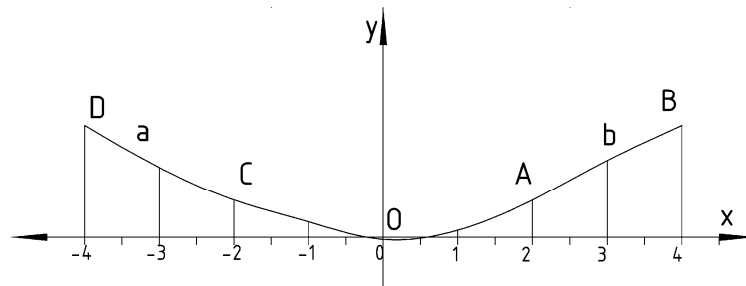


Рис. 3. Неперервна складена крива

Проведемо апроксимацію цих кривих і визначимо їх рівняння.

a: $y = -0.25x + 0.125x^2$;

b: $y = -0.25x + 0.5x^2 - 0.0625x^3$.

Коефіцієнти при x рівні за умовою гладкого стикування з першим порядком гладкості. Потрібно визначити ординати внутрішніх вузлів дискретно визначеної складеної кривої.

Складаємо рівняння рівноваги для кожного внутрішнього вузла. Отримуємо систему рівнянь, розв'язуємо її і результати записуємо у таблицю 1.

Таблиця 1. Ординати вузлів складеної кривої

i	1	2	3	4
	Неперервна форма	ДВК1	ДВК2	ДВК3 (з врахуванням умови гладкого стикування)
-4	3	3	3	3
-3	1.875	1.8542	1.8912	1.875
-2	1	1	1	1
-1	0.375	0.4375	0.3264	0.375
0	0	0.1667	-0.1296	0
1	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875
2	1	1	1	1
3	2.0625	2.1042	2.0301	2.0625
4	3	3	3	3

У першому стовпчику таблиці 1 – ординати неперервного аналога складеної кривої. У другому – ординати ДВК1 (рис.4), коли зовнішнє формоутворююче навантаження у вузлі O дорівнює P_a, у третьому стовпчику – ординати вузлів ДВК2 (рис.5), коли зовнішнє навантаження на вузол O дорівнює P_b. У четвертому стовпчику представлені ординати вузлів ДВК3 (рис.6), коли рівняння рівноваги вузла O замінено на умову гладкого стикування (7). Ординати вузлів складеної ДВК3 збігаються з ординатами неперервного аналога кривої.

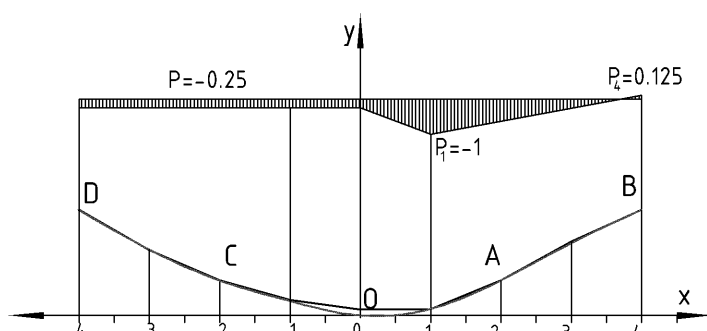


Рис.4. Схема навантаження і графічна інтерпретація ДВК1

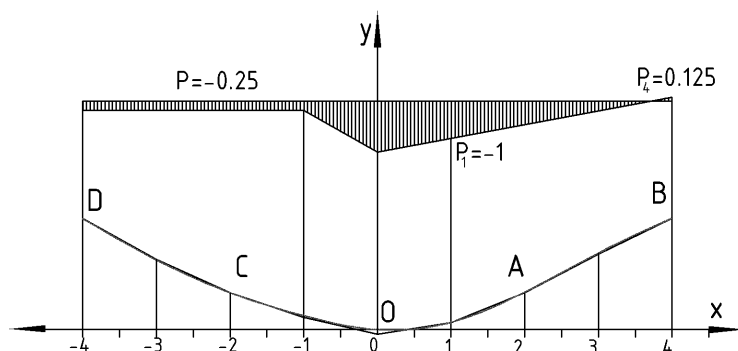


Рис.5. Схема навантаження і графічна інтерпретація ДВК2

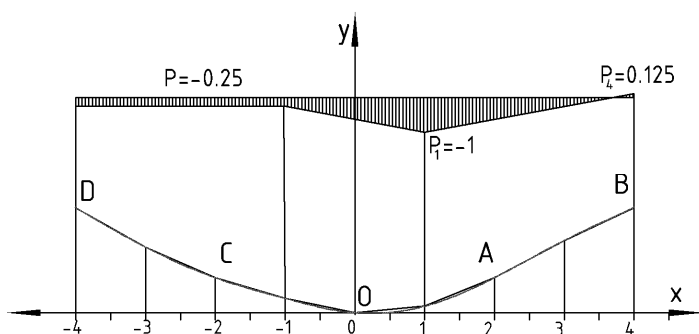


Рис.6. Схема навантаження і графічна інтерпретація ДВК3

Для виключення похибки дискретизації в околі точки стику при дискретному формуванні складеної ДВК статико-геометричним методом під дією рівномірного і лінійно-розподіленого навантаження, достатньо замінити рівняння рівноваги вузла стику на скінченно-різницеve рівняння, що описує умову точного стикування складових ДВК.

Висновки. Розроблено спосіб формування складеної ДВК статико-геометричним методом під дією рівномірного і лінійно-розподіленого навантаження, яке має перепад або злам у точці стику, вузли якої точно належать неперервному аналогу. Це дозволяє у дискретному вигляді розв'язувати задачі інтерполяції з довільним числом вихідних даних за аналогією з кусковою неперервною інтерполяцією.

1. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / Выгодский М.Я. – М.: Наука, 1977. – 871 с.
2. Савелов А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применение. Под редакцией А.П. Нордена [Текст] / А.А. Савелов – М.: Физматгиз, 1960. – 293с.
3. Ковалёв С.Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций: дис. ... доктора техн. наук. 05.01.01[Текст] / Ковалёв С.М. – М.: МАИ, 1986. – 348с.
4. Ковальов С.М. Точність формування складеної дискретно-визначеної кривої при кусково-лінійному розподілі зовнішнього навантаження [Текст] / С.М. Ковальов, А.В. Золотова // Прикладна геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць. – Вип. 79. – К.: КНУБА, 2008, – С. 19 – 23
5. Золотова А.В. Одновимірна кускова дискретна інтерполяція точок на площині [Текст] / А.В. Золотова // Наукові нотатки. – Луцьк, 2008. – Вип. 22. – С. 125 – 130.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2015.

УДК 515.2

Н.П. Исмаилова*Одесская государственная академия строительства и архитектуры***ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРЯЖЕННЫХ КВАЗИВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИСКЛЮЧАЮЩИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ**

Разработанный метод моделирования исходной квазивинтовой поверхности, определения интерференции сопряженных невольвентных зубчатых передач, позволяет определить аналитическую модель применительно зубчатых зацеплений в машиностроении.

Ключевые слова: квазивинтовая поверхность, интерференция, зубчатые передачи, невольвентные зубчатые передачи, сопряженные поверхности.

Н.П. Ісмаїлова**ПАРАМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЯЖЕНИХ КВАЗІВІНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ, ЩО ВИКЛЮЧАЮТЬ ІНТЕРФЕРЕНЦІЮ**

Розроблений метод моделювання вихідної квазівинтової поверхні, визначення інтерференції спряжених невольвентних зубчастих передач, дозволяє отримувати математичну модель стосовно сучасних технологій по виготовленню зубчастих зацеплень, що виключає інтерференцію.

Ключові слова: квазівинтова поверхня, інтерференція, зубчасті передачі, невольвентні зубчасті передачі, спряжені поверхні.

N. P. Ismailova**PARAMETRIC IDENTIFICATION CHARACTERISTICS CONJUGATED KVAZIVYNTOVYH SURFACES, WHICH ELIMINATES INTERFERENCE**

The developed method of modeling the initial quasi-helical surface definition interference conjugate involute gears, allows to define the analytical model applied in mechanical gearing.

The method allows to reduce contact stress by eliminating the interference phenomenon, has developed a new method of constructing an invariant conjugate kvazivintovyh surface without interference.

At the heart of the creation of the algorithm for determining the interference conjugate involute gear is Professor Podkorytova theorem on the definition of contact points conjugate generalized helical surfaces if each of the conjugate generalized surfaces regarded as the envelope of a family of pairwise conjugate Instant aksoidov satisfying the kinematic screw chart, each point of contact surfaces is defined as point of tangency line aksoidov contact with the surface.

Keywords: kvazivintovaya surface interference, gears, gearing neevolventnye, the mating surfaces.

Постановка проблеми. Главной проблемой в машиностроении существует необходимость создания и конструирования деталей - формирование сложных квазивинтовых поверхностей – неразрывно связанных со всеми видами производства. Технологические требования к точностным и динамическим характеристикам, уменьшение контактных напряжений путем исключения явления интерференции, вызывает необходимость обобщений и разработки нового инвариантного метода и алгоритма конструирования сопряженных квазивинтовых поверхностей, исключая интерференцию.

Анализ достижений и публикаций. В основе создания алгоритма определения интерференции сопряженных невольвентных зубчатых передач лежит теорема Подкорытова А.Н. об определении точек контакта сопряженных обобщенных винтовых поверхностей: если каждую из сопряженных обобщенных поверхностей Σ_A и Σ_B рассматривать как огибающую семейства попарно сопряженных мгновенных аксоидов $\dot{\Sigma}_A$ и $\dot{\Sigma}_B$, удовлетворяющих диаграмме кинематического винта, то каждая точка контакта поверхностей Σ_A и Σ_B определяется как точка касания линии контакта аксоидов с поверхностью Σ_A [1].

Формулировка целей статьи. Повысить производительность расчетно-графических работ. Разработать метод конструирования и определения интерференции сопряженных невольвентных поверхностей зубчатого зацепления передач.

Основная часть. За последние десятилетия в машиностроении начали широко применяться изделия, которые имеют сложный криволинейный профиль, криволинейную ось и переменный шаг. Внедрение в производство наиболее прогрессивных способов обработки изделий на станках с числовым программным управлением, создание автоматических линий с многоканальной обратной связью, в свою очередь, требуют разработки и внедрения общего инвариантного метода, компьютерного моделирования квазивинтовых поверхностей с пространственной линией контакта.

Базой для развития теоретических основ инвариантного метода формирования сопряженных квазивинтовых поверхностей зубчатых зацеплений, исключая интерференцию являются:

1. Исследование геометрии сопряженных квазивинтовых поверхностей с применением компьютерных технологий [2];
2. Инвариантный метод геометрического моделирования сопряженных квазивинтовых поверхностей высших кинематических пар [2];

При определении каждой точки контакта K сопряженных квазивинтовых поверхностей решается геометрическая задача по определению общей точки соприкосновения поверхностей Σ_A, Σ_B . Точка K определяется как точка пересечения характеристик т.е. $K = C_A \cap C_B$ [1,2];

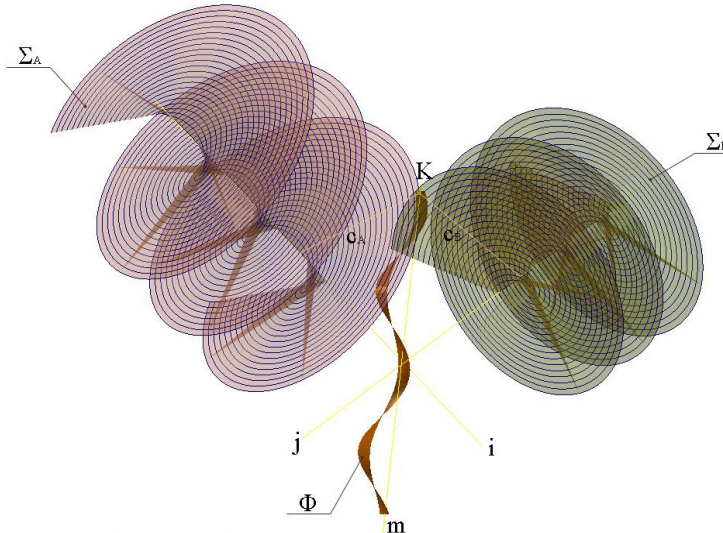


Рис. 1. Формализация процесса геометрического моделирования сопряженных квазивинтовых поверхностей семейством аксоидов.

Рассмотрим сущность инвариантного метода для формирования исходной поверхности Σ_A , линии зацепления квазивинтовых поверхностей Σ_B .

Метод определения интерференции сопряженных невольвентных зубчатых передач:

Этап 1

Задание исходных данных:

поверхности Σ_A задана;

Уравнением образующей: $\bar{r} = \bar{r}(\lambda); \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_1$

осью $\bar{a}(\tau) = \bar{p}_A + \bar{q}_A \tau, \quad \bar{p}_A, \bar{p}_A = \mathbf{1}$,

- параметром винта: $h_A = h_A(\lambda)$

для поверхности Σ_B известна:

- ось:

Этап 2

Определяем в векторной параметрической форме уравнение Σ_A :

$$\bar{S}(\lambda, \varphi) = \bar{p}_A + \bar{q}_A (\bar{q}_A (\bar{r}(\lambda) - \bar{p}_A)) + [\bar{r}(\lambda) - \bar{p}_A - \bar{q}_A (\bar{q}_A (\bar{r}(\lambda) - \bar{p}_A))] \cdot \cos \varphi + [\bar{q}_A \cdot (\bar{r}(\lambda) - \bar{p}_A - \bar{q}_A (\bar{q}_A (\bar{r}(\lambda) - \bar{p}_A)))] \cdot \sin \varphi$$

Этап 3

Определение интерференции невольвентных зубчатых зацеплений:

Определяем уравнение линии пересечения поверхности Σ_A и плоскости перпендикулярной оси \bar{i} :

- Уравнение плоскости, перпендикулярна оси \bar{i} , имеет вид:

$$\bar{Q}(\vartheta, \omega) = \bar{p}_A + [\bar{q}_A \cdot \bar{p}_A] \cdot v \cos \omega + [\bar{q}_A \cdot [\bar{q}_A \cdot \bar{p}_A]] \cdot v \cdot \sin \omega$$

- Связь между параметрами λ, φ, v и ω определяется из уравнения:

$$\bar{S}(\lambda, \varphi) = \bar{Q}(\bar{v}, \omega).$$

- В частности, отсюда находим

$$\varphi = \frac{\bar{q}_A(\bar{v}_A - \bar{r}(\lambda))}{h_A}$$

или

$$\varphi = \varphi_1(\lambda)$$

Подставляя последнее равенство в уравнение поверхности Σ_A , получим уравнение линии пересечения поверхности Σ_A и плоскости, перпендикулярной оси i :

$$\bar{i}(\lambda) = \bar{S}(\lambda, \varphi_1(\lambda))$$

Этап 4

Для каждого значения параметра $\lambda, \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_1$, найдем значение $\rho(\lambda)$ радиуса кривизны кривой $\bar{r}(\lambda)$ в точке λ :

$$\rho(\lambda) = \frac{\left[\left(\frac{d\bar{r}(\lambda)}{d\lambda} \right) \right]^2}{\sqrt{\left(\frac{d\bar{r}(\lambda)}{d\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{d^2\bar{r}(\lambda)}{d\lambda^2} \right) - \left(\frac{d\bar{r}(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot \left(\frac{d^2\bar{r}(\lambda)}{d\lambda^2} \right)^2}}$$

Этап 5

Определяем точку λ^* , в которой имеет место начало интерференции.

Пусть ρ_0 - радиус центриды ее минимальное значение, очевидно, равно числу $\bar{r}(\lambda_0) = \bar{r}(\lambda_1)$. Тогда условие отсутствия интерференции примет вид:

$$\rho(\lambda) > \rho_0$$

а условие начала интерференции

$$\rho(\lambda) = \rho_0$$

Решая последнее уравнение относительно λ , найдем его значения λ^* , которое определяет точку λ^* , в которой имеет место начало интерференции.

Аналитический метод формирования сопряженных квазивинтовых поверхностей Σ_A и Σ_B зубчатых передач применим и для частных случаев.

Если в уравнениях (1) и (2) винтовые параметры $h_A = 0$ и $h_B = 0$, то получим сопряженные поверхности вращения Σ_A и Σ_B .

Вывод: Разработанный метод моделирования исходной квазивинтовой поверхности определения интерференции сопряженных невольвентных зубчатых передач, позволяет получать аналитическую модель по современным технологиям для изготовления зубчатых зацеплений, что исключает интерференцию.

1. А.Н.Подкорытов. Исключение интерференции сопряженных поверхностей зубчатых передач. INTERNATIONAL CONGRES-GEAR TRANSMISSIONAL, Sofia-BULGARIA, 1995, с.143-145.
2. Подкорытов А.Н. Автоматизация, электронное моделирование и исследование интерференции сопряженных криволинейных поверхностей на базе ЭВМ. – Омск: Зап. - сиб. кн. изд-во, 1976, 168 с.
3. Исмаилова Н.П. Комплексний спосіб формування спряжених нелінійчатих поверхонь / Н.П. Исмаилова // Збірник наукових праць. Вісник КНУБА, – Київ, 2009. – С. 220-224.

УДК 621.43.038

В.А. Кищун, О.Г. Заєць*Луцький національний технічний університет***СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВНИХ ФОРСУНОК СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ COMMON RAIL**

Розглянуті сучасні методи діагностування дизельних форсунок паливної системи Common Rail. На підставі проведених досліджень встановлено, що метод вимірювання зміни кутової швидкості колінчастого валу двигуна під час роботи на холостому ході або частковому навантаженні менш трудомісткий у порівнянні з визначенням технічного стану форсунки на спеціальному стенді. Результати діагностування інжекторів обома методами підтвердили ідентичність останніх.

Ключові слова: технічний стан форсунки, діагностичний стенд, кутова швидкість колінчастого валу.

Рис. 5. Табл. 1. Літ. 10.

В.А. Кищун, О.Г. Заєць**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ COMMON RAIL**

Рассмотрены современные методы диагностики дизельных форсунок топливной системы Common Rail. На основании проведенных исследований установлено, что метод измерения изменения угловой скорости коленчатого вала двигателя при работе на холостом ходу или частичной нагрузке менее трудоемкий по сравнению с определением технического состояния форсунки на специальном стенде. Результаты диагностирования инжекторов обоими методами подтвердили идентичность последних.

Ключевые слова: техническое состояние форсунки, диагностический стенд, угловая скорость коленчатого вала.

V. Kyshchun, O. Zaiets**MODERN METHODS OF DIAGNOSIS FOR DIESEL FUEL INJECTOR SYSTEM POWER COMMON RAIL**

To effectively check the technical condition of the fuel injectors it requires special testing and diagnostic equipment. Main types of such equipment work by defining technical condition of using indirect parameters. In particular, the battery system for Common Rail injectors injections options are: number of fuel supply, a drop in pressure, tightness locking cone, the magnitude of the correction and its change over time and so on.

The process of checking the functioning injector diagnostic stand requires disassembly of the motor vehicle. Additional devices needed, tools for removal and installation of the nozzle. The complexity of services increases and efficient execution can only be done by a proper employee training.

The second, more modern method is diagnosing power injectors system Common Rail by measuring the change in angular velocity of the crankshaft of the engine during idling or partial load. Analyzing the correction parameters at different speed modes, you can define the technical condition of the fuel injector without spending time on its dismantling provided connectivity directly to the vehicle diagnostic equipment and the availability of the output signal. The results of both methods of diagnosing injectors confirmed the identity of the latter.

Keywords: technical condition of the injectors, diagnostic stand, angulator of crankshaft.

Постановка проблеми. Вимоги до швидкого і якісного діагностування паливних форсунок дизельних двигунів передбачають власне мінімізацію самого процесу. Тому, для ефективної перевірки технічного стану форсунок потрібне спеціальне випробувально-діагностичне обладнання.

Основні типи такого обладнання працюють методом визначення технічного стану за допомогою опосередкованих параметрів. Зокрема, для форсунок системи акумуляторного впорскування Common Rail такими параметрами є: дисперсність розпилювання, кількість подачі і зворотного зливу палива, час падіння тиску, герметичність запірнього конуса, тиск відкриття і звукова характеристика розпилювача тощо. За результатами проведених випробувань приймають рішення про технічний стан і необхідність заміни або ремонту форсунок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з найскладніших систем дизельного двигуна безспідставно вважається система живлення. Забезпечення низької витрати палива, зменшення викидів шкідливих речовин із вихлопними газами, безшумність роботи двигуна ставлять високі вимоги до двигуна і зокрема до системи впорскування палива. Ці вимоги задовольняє більшою мірою, вже згадана, паливна система акумуляторного типу Common Rail.

Переваги системи живлення акумуляторного типу над іншими обумовлені відразу декількома факторами, зокрема [1]:

– по-перше, жорсткі вимоги до двигунів відносно економічності та екологічності, які підвищуються з кожним роком. Дизельні двигуни зі старою системою живлення принципово нездатні вкладатися в рамки пропонованих вимог щодо захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів;

– по-друге, система Common Rail забезпечує економію палива за рахунок підвищеного тиску палива і, отже, кращого дисперсного розпилу його у камері згорання. Це, у свою чергу, сприяє повнішому і ефективнішому згорянню паливної суміші з найменшим викидом шкідливих речовин, зростанню потужності за менших витрат палива та зниження рівня шуму. Одночасно, протягом всієї тривалості впорскування (тобто часу, коли форсунка відкрита) постійний високий тиск в магістралі дозволяє отримати точне дозування палива.

Серед недоліків системи Common Rail можна зазначити такі:

– підвищені вимоги до чистоти і якості дизельного палива. Елементи паливної системи виконані з прецизійної точністю, під час попадання навіть дрібних сторонніх частинок під дією високого тиску пошкоджуються і виходять з ладу. У першу чергу, це стосується керованих електронікою форсунок з електромагнітними або п'єзоелектричними клапанами. Спроби використовувати низькоякісне паливо або невідповідні паливні фільтри можуть призвести до передчасного дорогого ремонту чи навіть до заміни системи;

– використання у системі великого числа різного роду датчиків, активаторів та інших елементів керування: датчик тиску в рампі, датчик потоку повітря, датчики положень розподільчого і колінчатого валів, температурні датчики двигуна і вхідного повітря, датчик положення педалі акселератора, датчик системи підігріву, соленоїди, клапан регулятора тиску в рампі, клапан турбонадуву, клапан системи рециркуляції вихлопних газів;

– відносно висока вартість деталей і запасних частин системи;

– ускладнення або неможливість провести ремонт або налаштування системи власними силами; для цього необхідний спеціальний стенд та інструменти;

– усе ще не достатній рівень кваліфікації персоналу для діагностики, ремонту і налаштування систем Common Rail у багатьох сервісних центрах.

Поміж компонентів паливної системи центральне місце займають форсунки, оскільки їх технічний стан значною мірою визначає техніко-економічні та екологічні показники роботи. Вона відіграє важливу роль:

– у формуванні процесу впорскування – забезпеченні точності зміни тиску і розподілу подачі палива відповідно до кута повороту колінчастого вала;

– в оптимальному розпилюванні і розподілі палива у камері згорання;

– у роз'єднанні системи живлення і камери згорання під час припинення подачі палива.

Сучасні форсунки – дуже складні вироби, масове виробництво яких зуміли налагодити такі відомі світові виробники, як BOSCH, DENSO, DELPHI, SIEMENS. Розрізняють форсунки з електромагнітним і п'єзоелектричним приводом. Серед форсунок з електромагнітним приводом найбільше поширення набули форсунки фірми BOSCH [2].

Мета роботи. Дослідження і порівняльний аналіз сучасних методів діагностування дизельних форсунок паливної системи акумуляторного впорскування Common Rail.

Результати досліджень. Обладнання та навчання спеціалістів технологіям ремонту новітніх паливних систем дорого обходиться для СТО. Через що, деякі автосервіси йдуть простішим і дешевшим шляхом, обладнуючи стенд для перевірки звичайних механічних форсунок контролером сигналів управління форсунками. Такий стенд не може розвинути тиск більше 400 бар, однак підключення до контролера управління дає імпульс на електромагнітний клапан інжектора, що дозволяє визначити його технічний стан.

Разом із тим, подібні прилади не дозволяють перевірити параметри роботи інжектора системи Common Rail і відтворити умови його роботи на двигуні, а це, у першу чергу, – високий тиск (1300...1600 бар) і точна оцінка кількості палива, що впорскується на кожному режимі імітації роботи дизеля. Механічний тестер також не дозволяє оцінити герметичність розпилювача інжектора за високого тиску.

Для повного циклу діагностики форсунок використовуються спеціальні стенди. Фірма BOSCH випускає обладнання для перевірки форсунок власної марки. Зокрема, BOSCH EPS 200 – це настільна установка для перевірки форсунок, насос-форсунок та інжекторів з електромагнітним керуванням, яка у автоматичному режимі дозволяє швидко визначити їх роботоздатність. Установка здійснює вимір об'ємної подачі палива відповідно до перевірочних протоколів для режимів холостого ходу, зворотного зливу і повного навантаження [3]. Під час роботи

перевіряється більше десятка параметрів: кількість впорскуваного і зворотнього палива на режимах холостого ходу, максимальне і проміжне навантаження, опір клапана інжектора на всіх режимах, момент початку подачі, герметичність тощо.

Також випускають стенди для перевірки форсунок і інші компанії. Серед них стенд DIESEL TECH DS2 виробництва грецької фірми CarbonZapp – компактна напівавтоматична установка для обслуговування форсунок Common rail фірм BOSCH, DELFI, DENSO [4]. Стенд має пневмо-гідравлічний привод насоса високого тиску і призначений для тестування, ремонту та регулювання дизельних форсунок системи Common Rail основних типів. Багатофункціональне меню, з можливістю програмування режимів тестування містить тест-плани. Визначення кількісних параметрів здійснюється вимірними пробірками, робочий тиск встановлюється регулятором та вимірюється електронним способом.

Серед українських виробників великою популярністю користується стенди виробництва хмельницької компанії Open System. Моделі CR-JET 4E і CR-JET 4M призначені для перевірки форсунок системи Common Rail BOSCH, DELPHI, DENSO, SIEMENS та здійснення їх регулювання після ремонту [5].

Передбачено два варіанти для визначення результатів тестування залежно від типу стенда. CR-JET 4E оснащений електронною системою виміру, яка дозволяє швидко отримувати результати випробувань з точністю $0,1 \text{ см}^3$. CR-JET4M оснащений класичною системою з вимірними колбами, де результати будуть отримані шляхом збору тест-рідини у тарованих колбах. Високий тиск у системі створюють насоси типу CP3. Датчик тиску 1800 бар і регулятор тиску палива знаходяться на чотириканальному акумуляторі тиску.

Стенди і сигнали для форсунок керуються програмою ARMD, яка дозволяє управляти Bosch, Delphi, Denso – форсунками з електромагнітними клапанами, а також включає в себе регульований сигнал Piezo (50V...180V) для інжекторів Bosch і Siemens. Базова програма містить більше 400 планів тестування. Також можна скопіювати і доповнити тестові плани самостійно.

На початку досліджень була виконана первинна перевірка роботи експериментальних форсунок. Так звана, функціональна оцінка, проводилася на випробувальному приладі марки BOSCH EFEP 60H для перевірки і регулювання форсунок спільно з імітатором сигналів CR Tester [6, 7]. Це досить складна операція, що вимагає великого досвіду і дотримання обов'язкових технічних умов, за якими необхідно проводити перевірку. Зокрема, вони включають: технічні вимоги для приладу; вимоги, що ставляться до випробувальної оливи, яка використовується у приладі та вимоги для додаткового обладнання (паливопроводу) приладу. Два перші застереження описані в міжнародних вимогах ISO №8984 і №4113, третє – ISO 4093 [8, 9].

З метою оцінки технічного стану було досліджено 16 форсунок Bosch № 0445110146, які встановлюються на двигуні G9U-720 автомобіля OPEL Vivaго. Визначались такі параметри: тиск спрацювання, середній час падіння тиску від 20 до 15 МПа, герметичність за запірним конусом, пропускна здатність за 1000 циклів при 125 МПа, магнітний зазор, хід голки та кульки розпилювача. Приладом для випробування служив вже зазначений комплекс: BOSCH EFEP 60H “плюс” CR Tester.

Встановлене значення тиску відкривання розпилювача, зазвичай, наноситься на його корпус (допуск складає $\pm 0,5 \text{ МПа}$). Якщо тиск відкривання розпилювача знаходиться поза допуском, він має бути відкоригований підбором регульованих шайб. Залежно від товщини шайб змінюється попередній натяг пружини форсунки. Як правило, зміна товщини шайби на $0,1 \text{ мм}$ призводить до зміни тиску відкривання на $1,0 \text{ МПа}$.

Якість розпилювання – це показник, що залежить від структурних параметрів розпилювача (хід голки, герметичність запірного конуса, дійсний діаметр і рівень закоксування отворів розпилювача) [10]. У факелі не повинно спостерігатись крапель, які вилітають окремо і суцільних струминок палива. Підтікання палива через соплові отвори не допускаються. Допустимим є зволоження торця (чи носика) розпилювача безпосередньо після закінчення впорскування.

Що б провести вимірювання і регулювання установочних розмірів, форсунка розбиралася. Для цієї операції використовувався спеціально спроектований затискний пристрій. У дослідних форсунках вимірювалися хід голки, електромагнітний зазор між електромагнітом і якорем та хід кулькового клапана.

Після складання форсунки здійснювалася експрес-перевірка інжектора за допомогою стенду для перевірки форсунок C-MAX 3000 і модулятора сигналів “COMMON RAIL TESTER”. Мета перевірки – переконатися, що під час складання не було допущено помилок.

Таким чином, наведений процес перевірки технічного стану форсунки вимагав її демонтажу з двигуна автомобіля та встановлення на стенд для подальшої діагностики. Потрібні також були додаткові пристрої, інструмент для розбирання і контролю зібраної форсунки. Тривалість, вартість і трудомісткість послуги зростала, а виконати її якісно міг лише працівник належної кваліфікації.

Натомість, одним із сучасних та перспективних методів діагностування технічного стану форсунок паливної системи Common Rail є метод вимірювання зміни кутової швидкості колінчастого валу двигуна під час роботи на холостому ходу або частковому навантаженні. Він забезпечує можливість отримання достовірної інформації про технічний стан паливних форсунок швидко, у необхідному обсязі та доступному вигляді.

Під час експерименту для вимірювання зміни кутової швидкості колінчастого валу на двигун автомобіля OPEL Vivaго встановлювалася дослідна партія з чотирьох форсунок із різним технічним станом. Останній визначався попередньо за допомогою гідравлічних випробувань, результати яких, а також установочні розміри зведені у таблицю 1.

Таблиця 1

**Результати гідравлічних випробувань і вимірювань
установочних розмірів [авторська розробка]**

№ форсунки	Час падіння тиску від 20 до 15 МПа, с			Середній час падіння тиску від 20 до 15 МПа, с	Герметичність за запірним конусом	Пропускна здатність за 1000 циклів при 125 МПа	Магнітний зазор, мм	Хід голки, мм	Хід кульки, мм
	1	2	3						
1	25,2	20,1	26,2	23,8	Сухий	48,5	0,09	0,30	0,05
2	7,1	7,0	6,2	6,8	Сухий	50,0	0,09	0,39	0,05
3	22,0	21,5	23,0	22,2	Сухий	48,5	0,09	0,33	0,05
4	2,5	2,6	2,8	2,6	Сухий	49,5	0,10	0,46	0,05
5	2,3	2,8	3,0	2,7	Прокапує; крапля за 2 с	56,0	0,08	0,32	0,05
6	4,0	4,5	4,1	4,2	Сльозиться	41,5	0,09	0,29	0,05
7	7,1	7,2	7,0	7,1	Прокапує; крапля за 7 с	46,0	0,10	0,34	0,05
8	17,1	15,8	16,9	16,6	Сльозиться	45,0	0,09	0,60	0,05
9	4,9	5,0	4,5	4,8	Сльозиться	44,5	0,09	0,34	0,05
10	7,0	8,5	7,2	7,6	Сльозиться	46,5	0,11	0,19	0,05
11	28,2	34,3	32,6	31,7	Сухий	39,5	0,08	0,53	0,04
12	29,2	30,5	30,6	30,1	Сльозиться	40,5	0,09	0,69	0,06
13	8,5	8,7	8,5	8,6	Прокапує; крапля за 30 с	43,0	0,09	0,34	0,05
14	17,2	18,8	16,9	17,6	Сухий	38,0	0,09	0,37	0,04
15	25,1	22,0	23,8	23,6	Сухий	42,0	0,09	0,29	0,06
16	6,2	5,9	6,2	6,1	Прокапує; крапля за 4 с	43,0	0,09	0,29	0,04

Автомобіль (у даному випадку OPEL Vivaго) з паливною системою живлення Common Rail для забезпечення моменту впорскування палива, обладнаний імпульсним давачем положення колінчастого валу двигуна. Блок керування двигуна (БКД), аналізуючи сигнал з давача, визначає прискорення чи сповільнення колінчастого валу під час робочого ходу у кожному циліндрі. Програмне забезпечення БКД, змінюючи величину імпульсу відкриття конкретної форсунки, забезпечує рівномірність обертання колінчастого валу двигуна. Ця величина називається корекцією витрати палива і визначається в мм³/цикл. Значення корекції можуть бути, як позитивні так і негативні та регламентуються заводом-виробником.

Аналізуючи параметри корекції на різних швидкісних режимах роботи двигуна, що, у свою чергу, є зміною кутової швидкості колінчастого валу, можна визначити технічний стан паливної форсунки без затрат часу на її демонтаж з двигуна та перевірки на спеціальному стенді.

Для зняття даних і виведення інформації з блоку керування двигуном до автомобіля підключається портативний діагностичний сканер "RENAULT CAN Clip" у вигляді апаратного модуля з відповідним програмним забезпеченням на ноутбучі (див. рис. 1). Він дозволяє відображати параметри з блоку керування двигуном як в реальному часі, так і проводити запис у вигляді графіків.

Переважна більшість автовиробників обладнують автомобіль уніфікованим діагностичним роз'ємом OBD2, який за допомогою спеціального протоколу передає дані від блоків керування до діагностичного сканера. В автомобіля OPEL Vivago він знаходиться під рульовою колонкою (див. рис.1).



Рис. 1. Підключення діагностичного сканера "RENAULT CAN Clip"

У процесі роботи кожний із циліндрів збільшує обертання колінчастого вала, за рахунок чого він короткочасно прискорюється після проходження верхніх мертвих точок (ВМТ). Якщо

паливо в циліндрі не загориться, відбувається вже не прискорення, а сповільнення обертання. Таким чином, ефективність роботи кожного з циліндрів можна оцінювати за прискоренням колінчастого вала після проходження ВМТ відповідних циліндрів. Незважаючи на те, що блок керування двигуном безперервно регулює частоту обертання колінчастого вала при роботі двигуна з метою підтримки обертів в заданому діапазоні – поштовхи від працюючих циліндрів присутні, а від непрацюючих відсутні.

Сигнал від датчика колінчастого вала містить у собі інформацію про значну кількість параметрів двигуна. Аналіз цих сигналів дозволяє оцінити, зокрема стан паливних форсунок та статичну і динамічну компресію у циліндрах.

Для отримання закономірностей зміни кутової швидкості колінчастого вала, яка відображається сканером у величині корекції

на кожному циліндрі, на двигун почергово встановлювались дослідні форсунок з різним технічним станом. Двигун прогрівався до робочої температури охолоджуючої рідини. Заміри проводилися у двох швидкісних режимах – у режимі холостого ходу 800 об/хв та 1500 об/хв. (на рисунках представлений лише режим холостого ходу). Дані корекції виводилися як у миттєвих значеннях величин, так і у вигляді осцилограми за певний період часу.

При першому експерименті знімалися показники з чотирьох технічно справних форсунок № 1, 2, 3 і 4, які успішно пройшли гідравлічні випробування і вимірювання установочних розмірів (див. табл. 1). Результати величини корекції даних форсунок у миттєвому числовому значенні склали, мм³/цикл: -0,27; -0,13; -0,30 і +0,69 відповідно, 1-го, 2-го, 3-го та 4-го циліндрів двигуна (див. рис. 2). Оскільки отримані дані не перевищують +/-2 мм³/цикл (дозволеної межі величини корекції встановленою технічною документацією на ремонт автомобіля), можна зробити висновок, посилаючись лише на величину корекції, що форсунок технічно справні.

EL0D		ТЕСТ ФУНКЦІЙ		ВПРЫСК ДИЗ.	
		РЕГУЛИР. ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА	1 / 1		
PR004	НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ КОМПЬЮТЕРА			14.1	V
ET105	УПРАВЛЕНИЕ РЕЛЕ НАСОСА НИЗК. ДАВЛЕНИЯ			АКТИВНАЯ	
PR006	РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ			771	об/мин
PR202	РЕГУЛИРУЕМЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА			1580	мм3/s
PR097	ОТН. Ц. ОТКР. КЛ. РЕГ. Д. В ОБЩ. Т-ПРОВ.			0	%
PR083	ДАВЛЕНИЕ В ОБЩЕМ ТОПЛИВОПРОВОДЕ			324.1	bar
PR033	ПОДАЧА ТОПЛИВА			9.3	мм3/ср
PR075	УСТАНОВКА ПОД. ТОПЛ. ПРИ ХОЛ. ХОДЕ			6.9	мм3/ср
PR524	КОРРЕКЦИЯ ДЕБИТА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 1			-0.27	мм3
PR589	КОРРЕКЦИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 2			-0.13	мм3
PR590	КОРРЕКЦИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 3			-0.30	мм3
PR525	КОРРЕКЦИЯ ДЕБИТА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 4			0.69	мм3
PR001	ТЕМПЕРАТУРА ТОПЛИВА			59.3	°C
PR005	НАГРУЗКА НА ПЕДАЛЬ			0	%

Рис. 2. Отримані значення величини корекції для форсунок № 1, 2, 3 і 4

Щоб побачити зміну величини корекції в часовому діапазоні дані також виводилися у вигляді осцилограми зміни корекції за часом (див. рис. 3). Як видно з рисунка, динаміка зміни корекції на усіх циліндрах двигуна становить не більше $0,10 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, що свідчить про стабільну характеристику форсунок № 1, 2, 3 і 4 та підтверджує їх справність.

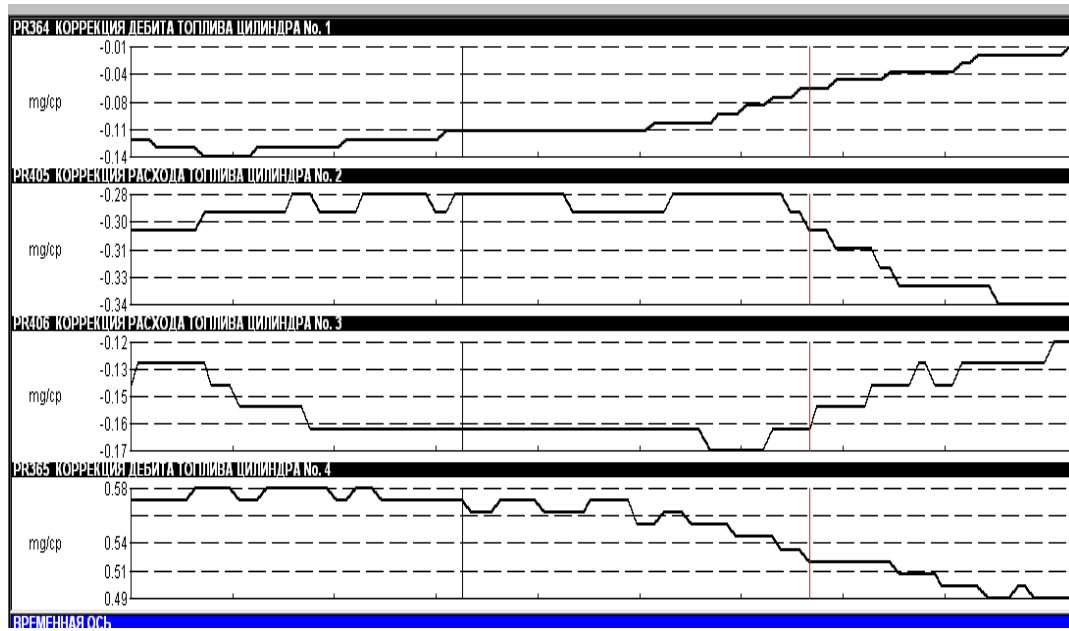


Рис. 3. Осцилограма зміни величини корекції для форсунок № 1, 2, 3 і 4

Наступним експериментом, коли для перших двох циліндрів двигуна використовувалися форсунки № 5 і 6, які мають суттєві відхилення пропускної здатності встановлено, що величини корекції на першому та другому циліндрах склали відповідно $-5,10 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ та $4,28 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ (див. рис. 4). З таблиці 1 видно, що збільшення циклової подачі форсунки № 5 ($56 \text{ мм}^3/\text{цикл}$) викликає збільшення величини корекції зі знаком “-”, а зменшення циклової подачі форсунки № 6 ($41,5 \text{ мм}^3/\text{цикл}$) викликає збільшення величини корекції зі знаком “+” (див. рис. 4).

Оскільки значення величини корекції під час проведення експерименту склало $-5,10 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ (що виходить за межі $\pm 2 \text{ мм}^3/\text{цикл}$), електронний блок керування вже не зміг вирівняти кутову швидкість колінчастого вала. Робота двигуна стала нестійкою, відчувалися підвищені вібрації. Негерметичність розпилювача форсунки №5 (див. табл. 1) спричинила погіршення токсичності випускних газів (появилася димність).

FL0C		ТЕСТ ФУНКЦІЙ		ВПРЬСК ДИЗ.	
		РЕГУЛИР. ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА	1 / 1		
PR004	НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ КОМПЬЮТЕРА			14.2	V
ET105	УПРАВЛЕНИЕ РЕЛЕ НАСОСА НИЗК. ДАВЛЕНИЯ			НЕ АКТИВНА	
PR006	РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ			774	об/мин
PR202	РЕГУЛИРУЕМЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА			2740	мм3/с
PR097	ОТН. Ц. ОТКР. КЛ. РЕГ. Д. В ОБЩ. Т-ПРОВ.			0	%
PR083	ДАВЛЕНИЕ В ОБЩЕМ ТОПЛИВОПРОВОДЕ			282.0	bar
PR033	ПОДАЧА ТОПЛИВА			2.7	мм3/ср
PR075	УСТАНОВКА ПОД. ТОПЛ. ПРИ ХОЛ. ХОДЕ			2.3	мм3/ср
PR524	КОРРЕКЦИЯ ДЕБИТА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 1			-5.10	мм3
PR589	КОРРЕКЦИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 2			4.28	мм3
PR590	КОРРЕКЦИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 3			0.06	мм3
PR525	КОРРЕКЦИЯ ДЕБИТА ТОПЛИВА ЦИЛИНДРА No. 4			0.86	мм3
PR001	ТЕМПЕРАТУРА ТОПЛИВА			57.1	°C
PR005	НАГРУЗКА НА ПЕДАЛЬ			0	%

Рис. 4. Отримані значення величини корекції для форсунок № 5, 6, 7 і 8

У графічному вигляді (див. рис. 5) динаміка зміни корекції на перших двох циліндрах двигуна становить близько $0,20 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, що свідчить про нестабільну характеристику форсунок № 5 і 6.

Визначення величини та зміни у часі корекції у двох інших дослідних партіях інжекторів та порівняння результатів із відповідними значеннями наведеними у таблиці 1 дозволили зафіксувати і підтвердити справність (або несправність) кожної з форсунок Bosch № 0445110146.

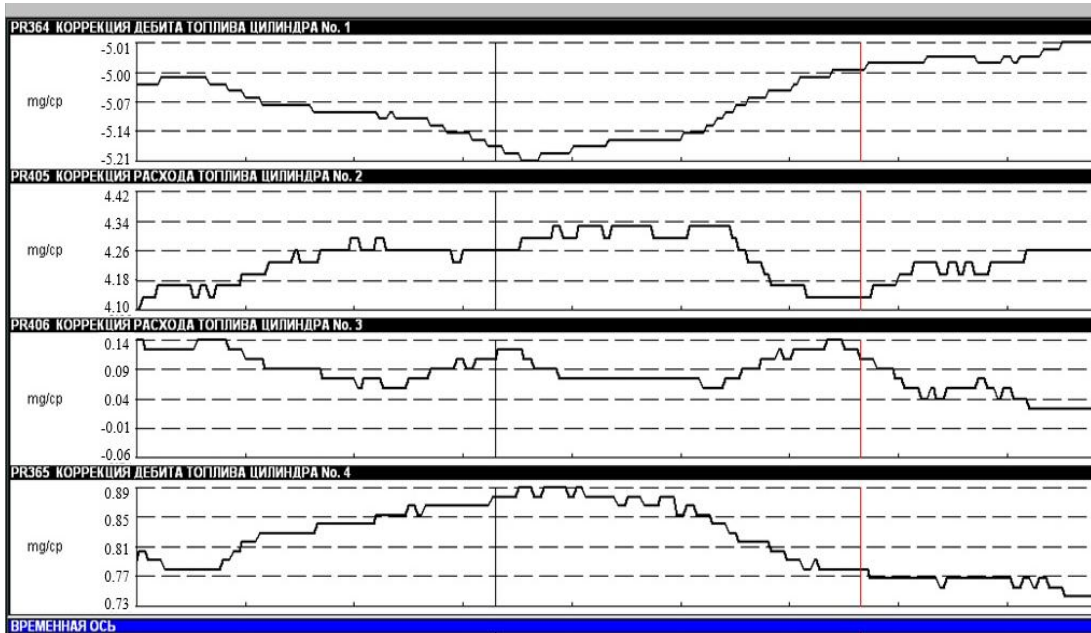


Рис. 5. Осцилограма зміни величини корекції для форсунок № 5, 6, 7 і 8

Висновки. Процес перевірки технічного стану форсунки на діагностичному стенді вимагає її демонтажу з двигуна автомобіля. Потрібні також додаткові пристрої, інструмент для зняття і встановлення форсунки. Трудомісткість послуги зростає, а виконати її якісно може лише працівник належної кваліфікації.

Аналізуючи параметри корекції на різних швидкісних режимах роботи двигуна, можна визначити справність паливної форсунки системи живлення Common Rail без витрат часу на її демонтаж із двигуна за умови можливості підключення безпосередньо до автомобіля діагностичного обладнання та наявності вихідного сигналу. У протилежному випадку діагностика проводиться на спеціальному стенді.

Результати дослідження технічного стану форсунок Bosch № 0445110146 підтвердили ідентичність обох методів, однак другий метод діагностування виявився простішим і менш трудомістким.

1. Дизельные аккумуляторные топливные системы Common Rail. Перевод с английского: Учебное пособие – М.: ЗАО «Легион-Автодата», 2005. – 48 с.
2. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.
3. Рекомендации для дизель-сервисов: Обслуживание форсунок дизельных двигателей / Под ред. инж. Т. Янишевского. – Польша, Варшава: WUZETEM, 2004. – 48 с.
4. DIESEL TECH DS2 Series. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.meta-scaner.com.ua>.
5. Стенд для проверки Common Rail форсунок CR-JET-4E [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ad-instrument.com.ua>
6. Прибор для проверки дизельных форсунок Bosch EFEP 60H [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bosch-kts.ru>.
7. “CR-тестер” прибор для диагностики электронных дизельных форсунок [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://opensys.prom.ua>.
8. Марков В., Тимченко В., Рындин И. Топливная аппаратура автомобильных и тракторных дизелей. – Ростов-на-Дону: ПОНЧИК, 2001. – 254 с.
9. Скляр В., Яковенко С., Скляр А. Ремонт и обслуживание форсунок дизельных двигателей: Практическое руководство. – Ростов-на-Дону: ПОНЧИК, 2000. – 24 с.
10. Кривенко П.М., Федосов И.М. Ремонт и техническое обслуживание системы питания автотракторных двигателей. – М.: Колос, 2006. – 288 с.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2015.

УДК 514.18:678.5.059:535.024:620.168:678.02:678.5.059

Колосова О.П.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
**ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
 ПРОСОЧЕННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ
 ПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ**

Розглянуто приклади практичної адаптації методології геометричного і математичного моделювання для детермінації параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів розчинами полімерних зв'язуючих. Визначено комплекс структурних характеристик геометричної моделі орієнтованих волокнистих полімерних композитів, а саме пористість, питому внутрішню поверхню та ефективний (гідрравлічний) капілярний радіус. Отримано задовільне співпадіння теоретичних і практичних результатів досліджень. На основі мікроструктурного аналізу шліфів якісно встановлена ефективність застосування ультразвукової обробки при одержанні композитів. Досліджено, що в обробленому низькочастотним ультразвуком затверділому композиті практично відсутні сторонні вclusions між волокнами, а самі волокна розподілені практично регулярно. Отримані результати дають можливість оптимізувати кінетичні параметри процесу просочення та конструктивні параметри просочувального обладнання.

Ключові слова: геом етричне моделювання, математичне моделювання, модель, структура, прогнозування, процес, технологія, просочення, параметр, полімер, зв'язуюче, волокно, композит

Е.П.Колосова

**ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
 ПРОПИТКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ЖИДКИМИ
 ПОЛИМЕРНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ**

Рассмотрены примеры практической адаптации методологии геометрического и математического моделирования для детерминации параметров технологического процесса пропитки ориентированных волокнистых наполнителей растворами полимерных связующих. Определен комплекс структурных характеристик геометрической модели ориентированных волокнистых полимерных композитов, а именно пористость, удельная внутренняя поверхность и эффективный (гидравлический) капиллярный радиус. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и практических результатов исследований. На основе микроструктурного анализа шлифов качественно установлено применение ультразвуковой обработки при получении композитов. Установлено, что в обработанном низкочастотным ультразвуком затвердевшем композите практически отсутствуют посторонние включения между волокнами, а сами волокна распределены практически регулярно. Полученные результаты дают возможность оптимизировать кинетические параметры процесса пропитки и конструктивные параметры пропиточного оборудования.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, математическое моделирование, модель, структура, прогнозирование, процесс, технология, пропитки, параметр, полимер, связующее, волокно, композит

Е.Р. Kolosova

**GEOMETRIC AND MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPREGNATION
 PROCESS OF ORIENTED FIBROUS FILLERS BY LIQUID POLYMERIC BINDERS**

The relevance and practical examples of adaptation of the methodology of geometric and mathematical modeling for determination of process parameters of impregnation of oriented fibrous fillers by solutions of polymeric binders is considered. The complex of the structural characteristics of the geometric model of oriented fibrous polymeric composites, namely porosity and specific internal surface of the effective (hydraulic) capillary radius is determined. A satisfactory agreement between the theoretical and practical research results is obtained. On the basis of microstructural analysis of thin sections is qualitatively established the effectiveness of ultrasonic treatment for formation of composites.

It is found that in low frequency ultrasonic treated hardened composite there is almost no foreign inclusions between the fibers, and the fibers themselves are distributed substantially regularly. The results obtained make it possible to optimize the kinetic parameters of the impregnation process and design parameters of the impregnation equipment.

Keywords: geometric modeling, mathematical modeling, model, structure, prediction, process, technology impregnation, parameter, polymer, binder, fiber, composite.

Постановка проблеми. Просочувально-сушильне обладнання широко застосовується при виготовленні реактопластичних армованих полімерних композиційних матеріалів, і, зокрема, препрегів [1–4]. Оскільки основними структурними елементами будь-якого виду вищезазначеного обладнання є вузли для просочування і наступного сушіння, виникає необхідність прогнозування параметрів технологічного процесу просочення. Останній в основному зумовлює продуктивність просочувальних ліній, а також якість полімерної продукції, що одержується.

Просочування здійснюють для надання висушеним матеріалам, що просочилися, певних властивостей (міцності, волого- і вогнестійкості, пружності, забарвлення і т.п.). Власне процес просочування включає в себе наступні основні стадії [1–4]: нанесення просочувального складу на

поверхню армуючого волокнистого наповнювача (ВН) чи занурення ВН у просочувальну ванну; проникнення просочувального складу в макропори ВН; дифузію просочувального складу до поверхні волокон; дифузію просочувального складу всередину волокон.

Проте вказані стадії не мають чітких кордонів, оскільки реальні ВН володіють неоднорідною структурою. До того ж на різних ділянках вищевказані стадії просочування протікають з різною швидкістю, що нерідко приводить до їх поєднання.

Не зважаючи на досягнуті успіхи у формуванні, переробці, а також одержанні армованих композитів, конструювання намотувальних виробів на базі орієнтованих і рулонних ВН і полімерних зв'язуючих (ПЗ), а також процеси та обладнання для їх виробництва до цих пір у більшості випадків базуються на евристичних началах і особистому досвіді розробників. Це призводить до нераціональних, і тим більше до нерентабельних конструкцій та виробів з таких композитів.

Виходячи з вищенаведеного, використання геометричного та математичного моделювання при проектуванні технологічного процесу просочування уявляється головною ланкою в підвищенні продуктивності проектування й техніко-економічних показників будь-якого виду обладнання цього типу загалом. Тому необхідно дослідити цю проблему більш детально.

Аналіз досліджень і публікацій. У загальному випадку структуру армованого полімерного композиту уявляють як капілярно-пористе середовище (тіло) [5]. Рушійними силами процесу просочування є саме капілярне всмоктування [5], а також сили, що впливають на розчин ПЗ і прискорюють його рух усередину ВН, або орієнтованого чи односпрямованого волокнистого наповнювача (ОВН).

Цим силам перешкоджають опір течії розчину ПЗ у порах ВН і поверхневе натягнення розчину ПЗ. Оскільки просочування ВН розчином ПЗ можна розглядати як витіснення повітря з пор і капілярів ВН та заміну його розчином ПЗ [1], цей процес можна класифікувати як один з прикладів капілярних явищ [5].

Тривалість перебування ВН в просочувальному розчині (час просочування) визначається швидкістю руху полотна і розмірами просочувальної ємності (ванни). У роботі [1] пропонується опис процесу просочування ВН рідким ПЗ проводити за допомогою відомого рівняння Дарсі (1):

$$V = \sqrt{S \left(\frac{2k_n \varepsilon_n}{\eta} \right) \frac{P}{t}}, \quad (1)$$

де V – швидкість просочування (або збільшення вмісту ПЗ); S – площа поверхні ВН, що просочується; k_n – експериментальна константа; ε_n – пористість ВН; η – в'язкість розчину ПЗ; P – тиск при просочуванні; t – час просочування.

Рівняння (1), зокрема, показує, що для збільшення вмісту ПЗ (або швидкості V) у структурі ВН вдвічі необхідно в чотири рази збільшити час перебування ВН у розчині ПЗ. У той же час вміст ПЗ (або швидкість V) є обернено пропорційним в'язкості розчину ПЗ, яка, як відомо, залежить від температури просочування [1].

Відомо [6–8], що базовим питанням при детермінуванні параметрів кінетичного рівняння процесу просочування є коректне знаходження характеристик геометричної (фізичної) моделі структури ОВН, на основі якої отримують це рівняння, а саме пористості ε , питомої внутрішньої поверхні S_{int} та ефективного (гідравлічного) капілярного радіусу r_{ef} того чи іншого типу використовуюваного для просочування типу ОВН.

Було досліджено, що при побудові геометричної (фізичної) моделі структури ОВН є доцільним використання структурного підходу (а саме мікροструктурного аналізу перетину композиту на основі ОВН) для визначення шуканих параметрів, зокрема, ефективного (гідравлічного) капілярного радіусу r_{ef} [8].

При цьому найбільш адекватним уявленням структури ОВН є структура капілярно-пористого тіла. Остання складається із системи паралельно-звивистих капілярів різних радіусів, яку для випадкової (стохастичної) величини їх розміщення можна адекватно описати за допомогою функції розподілу пор радіусу ρ по розмірах $\varphi(\rho)$ [5].

Відповідно до використовуюваного підходу в роботі [8], після затвердіння просоченого ОВН за визначеного зусилля натягнення ОВН при просочуванні роблять мікрошліф його перетину у поперечному до волокон напрямі. Далі у перетині мікрошліфу експериментально досліджують розподіл довжин екстхорд волокон (відстаней між суміжними волокнами), або функцію розподілу

$\varphi(\rho) = G(\ell)$ випадкових пор за розмірами ℓ . При цьому екстхорди являють у нашому випадку еквівалентний (ефективний) діаметр (чи подвійний радіус r_{ef}) пор, причому довжини екстхорд носять випадковий характер.

Детермінацію теоретичної кривої розподілу $\varphi(\rho) = G(\ell)$ проводять за умови найкращого наближення (тобто мінімального відхилення) теоретичної кривої розподілу до експериментальних ординат. Надалі за допомогою знайденої функції розподілу довжин екстхорд $\varphi(\rho) = G(\ell)$ обчислюють пористість ε , питому внутрішню поверхню S_{num} та ефективний (або еквівалентний) капілярний радіус r_{ef} шуканого ОВН як капілярно-пористого тіла.

Цілі статті. Метою даної роботи є застосування методології геометричного та математичного моделювання для прогнозування параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими, що дозволить оптимізувати кінетичні параметри цього процесу та конструктивні параметри просочувального обладнання.

Основні матеріали дослідження. У роботі [10] була розглянута геометрична модель середовища орієнтованого волокнистого полімерного композиту (ОВПК) у вигляді системи циліндричних волокон, осі яких у загальному випадку паралельні і розташовані у вузлах подвійноперіодичної (регулярної) решітки паралелограмів, а простір між волокнами заповнений затверділим ПЗ. Визначення параметрів цієї геометричної моделі здійснюється на базі використання методології теорії інтегральної геометрії і геометричних імовірностей шляхом дослідження (функції) розподілу відстаней між суміжними колами, що розташовані у вузлах подвійноперіодичної решітки, і які перетинаються випадковими січними.

Здійснено детермінацію структурних параметрів цієї геометричної моделі ОВПК за припущення незмінності розташування волокон у структурі просоченого ОВН під час його сушіння за стаціонарності значення зусилля натягнення ОВН. Пористість ε у капілярно-пористому тілі згідно [5], наприклад, визначається так:

$$\varepsilon = N^0 \pi \beta_i \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}^2}{4} = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho, \quad (1)$$

де N^0 — кількість замірів поміж волокнами у площині шліфу композиту.

У свою чергу, питому внутрішню поверхню S_{num} можна визначити таким чином [5]:

$$S_{num} = k_o N^0 \pi \beta \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \kappa_o N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}, \quad (2)$$

де $\bar{\rho}$ — середній радіус пор, а коефіцієнти κ_o і β_o можна трактувати як поправочні коефіцієнти, що враховують специфіку структури ОВН як капілярно-пористого середовища (і які означають відповідно шорсткуватість поверхні і звивистість еквівалентного циліндричного капіляра).

Якщо прийняти відповідно до робіт [6, 7] як ефективний (або еквівалентний капілярний радіус) r_{ef} шуканого ОВН гідравлічний радіус, що визначається за аналогією з «ідеальним» циліндричним капіляром як відношення подвоєного об'єму пор до їх поверхні, то будемо мати:

$$r_{ef} = \frac{2\varepsilon}{S_{num}} = \frac{2}{\kappa_o} \left[\int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right]. \quad (3)$$

Було, зокрема, встановлено [8], що для практичних обчислень функцію розподілу довжин екстхорд волокон, яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат, зручно описувати у такому вигляді:

$$G(\ell) = \varphi(\rho) = \frac{c_\kappa b^{(1/c_\kappa)}}{\Gamma(1/c_\kappa)} e^{-b_\kappa \rho^{c_\kappa}}, \quad (4)$$

де b_k, c_k – позитивні константи, що визначаються за умови найкращого наближення теоретичної кривої (4) до експериментальних ординат; Γ – гамма-функція Ейлера.

Для цього випадку рівняння (4) наведемо й інші залежності. Так, зокрема, математичне очікування випадкової величини ρ , функція розподілу $\varphi(\rho)$ якої описується за допомогою рівняння (4), має такий вигляд:

$$M(\rho) = \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \frac{\Gamma(2/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}. \quad (5)$$

Формула (1) для пористості ε прийме наступний вигляд:

$$\varepsilon = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \cdot \frac{\Gamma(3/c_k)}{b^{(2/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}, \quad (6)$$

а формула для еквівалентного капілярного радіусу (3) запишеться таким чином:

$$r_{ef} = \frac{2}{\kappa_o} \left[\int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right] = \sqrt{2} \frac{\Gamma(1/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}. \quad (7)$$

Рівняння (3), (4), (6) і (7) повністю визначають комплекс структурних характеристик геометричної моделі ОВПК, а саме пористість ε , питому внутрішню поверхню S_{num} та ефективний (гідралічний) капілярний радіус r_{ef} .

Прогнозування кінетичних параметрів поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими

В роботі [11] було наведено прогностичне кінетичне рівняння процесу поздовжнього просочення ОВН рідкими ПЗ:

$$t_1 = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2 r_{ef}} \left[\ln \left| \frac{\exp(1)}{1 - \varepsilon \gamma g h / S_{y0} \sigma \cos \theta} \right| - \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{y0} \sigma \cos \theta} \right], \quad (8)$$

де t_1 – час поздовжнього просочування; h – висота поздовжнього просочування; $\sigma \cos \theta$ – змочувальна здатність; θ – крайовий кут змочування; η – динамічна в'язкість розчину ПЗ; γ – динамічна в'язкість розчину ПЗ.

Рівняння (8) після підстановки відповідних величин з урахуванням рівнянь (2), (6) і (7) прийме такий вигляд:

$$t_1 = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2} \cdot \frac{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}{\sqrt{2} \cdot \Gamma(3/c_k)} \left[\ln \left| \frac{\exp(1)}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right| + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Експериментальну перевірку прогностичного кінетичного рівняння (9) здійснювали на прикладі скловолокнистого і органоволокнистого джгутів (діаметром 2,5 мм і довжиною 100 мм), які просочували розчином епоксидної смоли марки ЕД-20 при температурі 50 °С і зусиллі натягнення джгута 30 Н/м. Виміряна реовіскозімометром динамічна в'язкість розчином епоксидної смоли при даній температурі склала $\eta = 0,48$ Па·с, а змочувальна здатність $\sigma \cos \theta$, обрахована по максимальній висоті підйому зв'язуючого по волокну під дією сил поверхневого натягнення за формулою [12]:

$$\sigma \cos \theta = \frac{h_{\infty} \gamma g R_k}{2}, \quad (10)$$

де h_{∞} – максимальна висота підйому рідини (поздовжнього просочування); R_k – радіус капіляра, склала $\sigma \cos \theta = 2 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

З рис. 1, на якому показана кінетична крива поздовжнього просочення, видно добрий збіг експериментальних і розрахованих за рівнянням (9) значень.

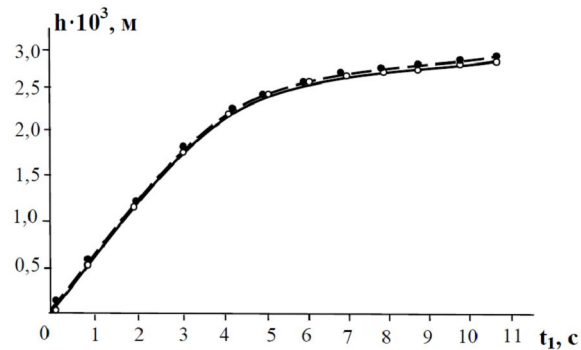
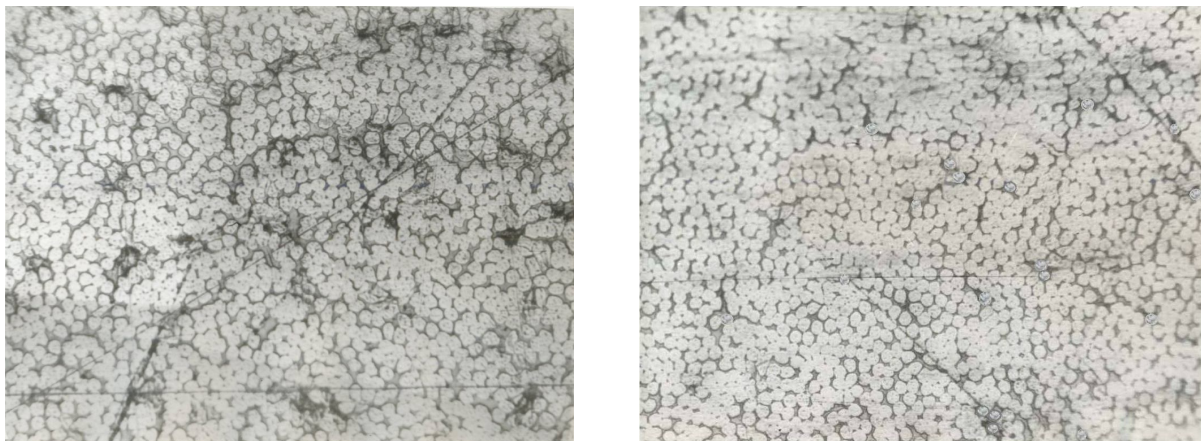


Рис. 1. Кінетичні криві поздовжнього просочування скловолокнистого джгута розчином епоксидного зв'язуючого ЕД-20 при температурі 50 °С і зусиллі натягнення джгута 30 Н/м: (●) – прогностична крива, побудована за рівнянням (9); (○) – експериментальні значення

Таким чином, розроблений удосконалений підхід дає можливість здійснювати моделювання параметрів технологічного процесу просочення ОВН рідкими ПЗ з врахуванням інтегральних характеристик ОВН як капілярно-пористого тіла.

Порівняльний аналіз структури орієнтованих волокнистих наповнювачів, просочених рідкими епоксидними зв'язуючими, за ультразвукової дії

На рис. 2 наведена типова фотографія мікросліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного органопластика, одержаного за «вільного» просочення, тобто без ультразвукової (УЗ) дії, так з УЗ-дією.



а

б

Рис. 2. Типова фотографія мікросліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного органопластика, одержаного без УЗ-обробки (а) і за ефективних режимів УЗ-обробки (б). Збільшення $\times 1200$

Проведені дослідження [13] свідчать про покращення експлуатаційних властивостей затверділої полімерної матриці. Внаслідок цього можна очікувати й на поліпшення експлуатаційних властивостей ОВПК на її основі, про що опосередковано може свідчити розподіл волокон у структурі шліфу (див. рис. 2, б).

Порівнюючи якісно обидва шліфи (рис. 2, а,б), можна помітити, що в обробленому низькочастотним УЗ затверділому ОВПК практично відсутні сторонні включення (у т.ч. повітряні порожнини) між волокнами, а самі волокна розподілені практично регулярно. Це свідчить на користь застосування апроксимуючої подвійно-періодичної структурної моделі ОВПК для прогнозування технологічних параметрів процесу просочення (див. рис. 2, а,б), а також про ефективність застосування УЗ-обробки при одержанні ОВПК [14-15].

На рис. 3 показана експериментальна гістограма, а також теоретична крива розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) (4) $f_{\Delta}(z) = G(\ell)$ в структурі ОВПК.

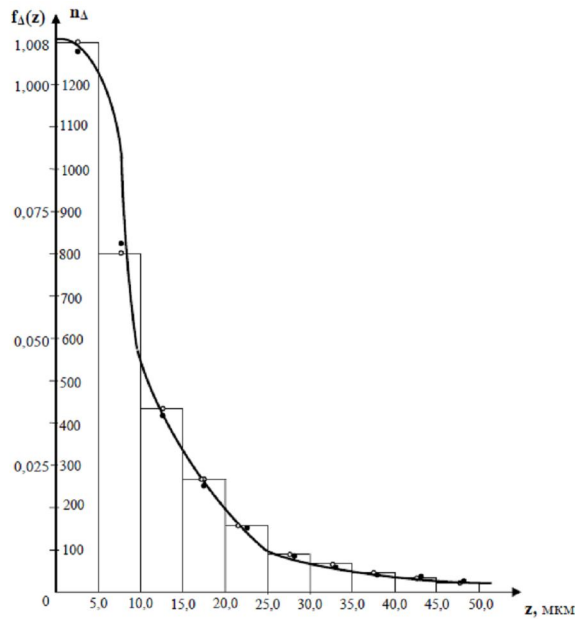


Рис. 3. Гістограма і криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) $f_{\Delta}(z)$, отриманих за ефективних режимів низькочастотної ультразвукової дії: експериментальні ординати (\circ); теоретичний розподіл (4) (\bullet); n_{Δ} – кількість замірів

Наведемо значення виразів (5) – (7) для функції розподілу довжин екстхорд волокон, яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат (\circ) – див. рис. 3. Так, при кількості замірів поміж волокнами $N^{\circ} = 2500$ у площині шліфу композиту (див. рис. 2, а, б) і значеннях $\beta_o = 1,1$, $\kappa_o \approx \sqrt{2}$ [6, 9] математичне очікування (5) дорівнює $M(\rho) = 8,158$ мкм. При цьому постійні рівняння (4) для необробленого УЗ ОВПК становлять: $b_{\kappa} = 0,129$, $c_{\kappa} = 0,9812$, пористість (6) $\varepsilon = 0,28$ (тобто коефіцієнт армування або об'ємний вміст ОВН у структурі композиту складає $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,72$), а ефективний (еквівалентний) капілярний радіус (7) $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,96$ мкм ≈ 6 мкм.

Знайдені для ОВПК, обробленого УЗ, постійні теоретичного рівняння (4) становлять: $b_{\kappa} = 0,125$, $c_{\kappa} = 0,992$, пористість (6) $\varepsilon = 0,27$ (тобто коефіцієнт армування чи об'ємний вміст ОВН у структурі композиту складає $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,73$), а ефективний (еквівалентний) капілярний радіус (7) $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,77$ мкм $\approx 5,8$ мкм.

За отриманими експериментальними ординатами (\circ) гістограми розподілу довжин екстхорд суміжних волокон проводиться теоретична крива (4) з урахуванням її найменшого відхилення від експериментальних ординат (\circ). Надалі здійснюють оптимізацію кінетичних параметрів процесу просочення (час, висота чи швидкість просочування) та конструктивні параметри (зокрема, габарити ванни) просочувального обладнання.

Висновки. Роглянуто приклад практичної адаптації методології геометричного і математичного моделювання для детермінації параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів розчинами полімерних зв'язуючих. Отримано задовільне співпадання теоретичних і практичних результатів досліджень. Також на основі мікроструктурного аналізу шліфів якісно встановлена ефективність застосування ультразвукової обробки при одержанні композитів. Отримані результати дають можливість оптимізувати кінетичні параметри процесу просочення та конструктивні параметри просочувального обладнання.

1. Шалун Г. Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е. М. Сурженко. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
2. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. Ч.1 / Цыплаков О. Г. – Пермь, 1974. – 317с.
3. Плоткин Л. Г. Технология и оборудование пропитки бумаги полимерами / Л. Г. Плоткин, Г. В. Шалун – М.: Лесная промышленность, 1985. – 119 с.
4. Коновалов В. И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / Коновалов В. И. – М.: Химия, 1989. – 224 с.
5. Аксельруд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
6. Чизмаджев Ю. А. Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич и

- др. – М.: Наука, 1971. – 364 с.
7. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
 8. Колосов О.Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О.Є. Колосов // Вісник НТУУ КПІ. Сер. «Машинобудування». – 2010. – №59. – С. 96 – 101.
 9. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконных материалов. Ч.1 / Цыплаков О. Г. – Пермь, 1974. – 317с.
 10. Колосов О.Є. Фізична модель структури капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричковська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №1. – С. 6–9.
 11. Колосов О.Є. Кінетика процесу просочування волокнистих наповнювачів композиціями епоксидних полімерів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричковська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №2. – С. 13–16.
 12. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых. – М.: Химия, 1979. – 304 с.
 13. Колосов О.Є. Використання методів математичного та експериментально-статистичного моделювання для оптимізації технологічних параметрів ультразвукового одержання полімерних композиційних матеріалів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеев, О.П. Колосова // Журнал Кам.-Под. нац. ун-ту «Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Техн. науки». – 2014. – Вип. 11. – С. 61 – 72.
 14. Колосов О.Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Є.М. Панов та ін. – К.: ВД «Едельвейс», 2012. – 268 с.
 15. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2015.

В.М. Комяк, О.М. Соболев, Ю.С. Чапля

Національний університет цивільного захисту України (м. Харків)

**МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ ПЛОСКИХ НЕОРІЄНТОВАНИХ
ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З КУСОЧНО-НЕЛІНІЙНИМИ ГРАНИЦЯМИ У
ПРЯМОКУТНІЙ ОБЛАСТІ ЗМІННОЇ ДОВЖИНИ**

У роботі розроблено модель та метод оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями у прямокутній області змінної довжини. Розглянуто особливості запропонованого методу та визначено шляхи подальших наукових досліджень.

Ключові слова: оптимізація, розміщення, неорієнтований об'єкт з кусочно-нелінійною границею.

В.М. Комяк, А.Н. Соболев, Ю.С. Чапля

**МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОСКИХ НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С КУСОЧНО-НЕЛИНЕЙНЫМИ ГРАНИЦАМИ В
ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ**

В работе разработаны модель и метод оптимизации размещения плоских неориентированных геометрических объектов с кусочно-нелинейными границами в прямоугольной области переменной длины. Рассмотрены особенности предложенного метода и определены пути дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: оптимизация, размещение, неориентированный объект с кусочно-нелинейной границей.

V.M. Komyak, O.M. Sobol, Yu.S. Chaplya

**THE METHOD OF OPTIMUM PLACEMENT NOT ORIENTED PLANE GEOMETRIC
OBJECTS WITH SECTIONAL NONLINEAR FRONTIERS IN RECTANGULAR AREA WITH
VARYING LENGTH**

In this paper the model and method of optimum placement not oriented plane geometric objects with sectional nonlinear frontiers in rectangular area with varying length are developed. Features of the proposed method are considered and the ways of further research are defined.

Keywords: optimization, placement, not oriented object with sectional nonlinear frontier.

Постановка проблеми. На теперішній час у різних галузях діяльності людини виникають оптимізаційні задачі розміщення об'єктів, що мають велике теоретичне та прикладне значення. Якщо розглянути задачі оптимізаційного розміщення двовимірних об'єктів, то до даного класу можуть бути зведеними у своїх постановках практичні задачі, що виникають у легкій промисловості, машинобудуванні, електроніці, транспортній галузі тощо.

Слід відзначити, що серед задач розглянутого вище класу існують такі, що до теперішнього часу не були розв'язаними. Саме до таких відносяться задачі оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями. Дані задачі мають важливе значення, наприклад, для швейної промисловості, оскільки при розкрою матеріалів є необхідність у максимально повному використанні матеріалу. Якщо не існує технологічних обмежень на орієнтацію викрійок відносно тканини, то представлення їх за допомогою неорієнтованих об'єктів, які можуть здійснювати поворот відносно власної системи координат, дозволить збільшити коефіцієнт заповнення, тобто більш економно використовувати матеріал. Таким чином, існує актуальна науково-прикладна проблема оптимального розміщення неорієнтованих геометричних об'єктів з нелінійними границями у заданих областях. Однією із задач, що сприятиме вирішенню вказаної проблеми, є задача оптимального розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями у прямокутній області змінної довжини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд класу задач оптимізаційного геометричного проектування, до яких відноситься задача оптимального розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями, наведено у роботі [1]. У роботі [2] здійснено постановку задачі оптимального розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями. Роботу [3] присвячено розробці загальної моделі оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями у заданих областях та дослідженню особливостей зазначеної моделі, що дозволить створити обґрунтований метод розв'язання поставленої задачі. Моделям та

методам розв'язання класу задач оптимізаційного геометричного проектування присвячено, наприклад, роботи [4-6].

Формулювання цілей статті. У даній роботі, на підставі створеної загальної моделі [3], необхідно розробити метод оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями у прямокутній області змінної довжини.

Основна частина. Розглянемо постановку задачі. Нехай у двовимірному просторі задано об'єкти розміщення $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, з кусочно-нелінійними границями. Дані об'єкти є неорієнтованими і задаються послідовністю своїх вершин $\{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im_i}\}$, $v_{id} = (x_{id}(\theta_i), y_{id}(\theta_i))$, $d = 1, 2, \dots, m_i$, у локальній системі координат, причому нумерація вершин здійснюється проти годинникової стрілки. Кожна пара вершин (v_{id}, v_{id+1}) з'єднується фрагментом кривої 2-го порядку:

$$a_{i,dd+1,1}(\theta_i)x_i^2 + a_{i,dd+1,2}(\theta_i)x_i y_i + a_{i,dd+1,3}(\theta_i)y_i^2 + a_{i,dd+1,4}(\theta_i)x_i + a_{i,dd+1,5}(\theta_i)y_i + a_{i,dd+1,6}(\theta_i) = 0, \quad (1)$$

де $a_{i,dd+1,c}(\theta_i)$, $c = 1, \dots, 6$ – параметри квадратичної форми, що описує фрагмент границі між вершинами v_{id} та v_{id+1} об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$.

Необхідно розмістити об'єкти $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$, $i = 1, \dots, N$, у прямокутній області $S_0(l, b)$ таким чином, щоб довжина l була мінімальною і при цьому виконувались обмеження на:

- взаємний неперетин об'єктів $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ та $S_j(x_j, y_j, \theta_j)$, $i = 1, \dots, N$, $j = i + 1, \dots, N$;
- належність об'єктів $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ області $S_0(l, b)$.

Введемо вектор параметрів $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$, $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$, $i = 1, \dots, N$, $u \in R^q$, $q = 3N$.

Вектор всіх змінних задачі позначимо $Z = Z(u, l) \in R^{q+1}$. Тоді загальна модель оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями має наступний вигляд:

$$l^* = \arg \min_{u \in W} Z(u, l), \quad (2)$$

де W :

$$\Phi(x_i, y_i, \theta_i, x_j, y_j, \theta_j) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad j = i+1, \dots, N; \quad (3)$$

$$\Phi_{cS_0}(x_i, y_i, \theta_i, 0, 0) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

В моделі (2)-(4) вираз (2) являє собою цільову функцію задачі; вираз (3) – умову взаємного неперетину об'єктів розміщення; вираз (4) – умову належності об'єктів області розміщення, причому cS_0 – доповнення S_0 до двовимірного простору. Слід відзначити, що для формалізації обмежень (3) і (4) використано апарат Φ -функцій, введений в роботах Ю.Г. Стояна [4].

Розглянемо метод знаходження локально-оптимальних розв'язків задачі (2)-(4), основою якого є метод оптимізації за групами змінних. Для випадкової перестановки номерів об'єктів $\{i_1, i_2, \dots, i_N\} \in \{1, \dots, N\}$ в межах оптимізаційної серії, кількість яких дорівнює N_s , здійснюється послідовне розміщення заданих геометричних об'єктів. Так, приклад розміщення геометричного об'єкта $S_{i_1}(x_{i_1}, y_{i_1}, \theta_{i_1})$ наведено на рис. 1.

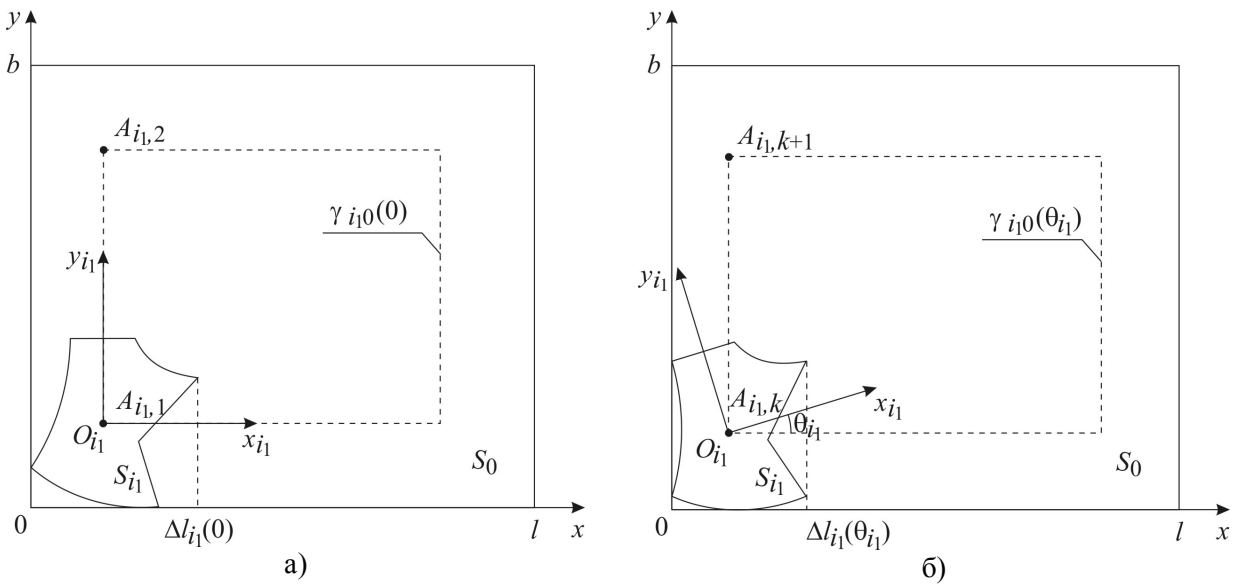


Рис. 1. Розміщення геометричного об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$

Введемо параметр дискретизації n_i кута повороту θ_i об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$. Тоді $\Delta\theta_i = \frac{2\pi}{n_i}$, $\theta_i = k \cdot \Delta\theta_i$, $k = 0, 1, \dots, n_i - 1$. Для кожного значення k здійснюється побудова контуру дотику $\gamma_{i,0}(\theta_i)$, при цьому здійснюється аналіз припустимих точок розміщення $A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,k}, A_{i,k+1}, \dots$ початку локальної системи координат об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$. Координати даних точок визначаються за допомогою розв'язання лінійної системи рівнянь виду:

$$\begin{cases} a_{i,0,p}(\theta_i)x + b_{i,0,p}(\theta_i)y + c_{i,0,p}(\theta_i) = 0; \\ a_{i,0,q}(\theta_i)x + b_{i,0,q}(\theta_i)y + c_{i,0,q}(\theta_i) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$p = 1, 2, 3$; $q = p + 1, \dots, 4$. Дані рівняння описують елементи контуру дотику $\gamma_{i,0}(\theta_i)$ об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ та доповнення області S_0 до двовимірного простору і розв'язуються для фіксованого θ_i .

Для прикладу, що наведений на рис. 1, цільова функція (2) приймає однакові значення при розміщенні початку локальної системи координат об'єкта $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ у т. $A_{i,k}$ і $A_{i,k+1}$. Виходячи із технологічних вимог обираємо т. $A_{i,k}$ і фіксуємо параметри розміщення x_i, y_i, θ_i .

На рис. 2 наведено приклад розміщення об'єкта $S_{i_2}(x_{i_2}, y_{i_2}, \theta_{i_2})$.

Так, координати т. $A_{i_2,k}$ і $A_{i_2,k+1}$ визначаються за допомогою системи рівнянь виду (5), причому т. $A_{i_2,k}$ є неприпустимою, оскільки при розміщенні у ній початку локальної системи координат об'єкта $S_{i_2}(x_{i_2}, y_{i_2}, \theta_{i_2})$ відбудеться перетин з об'єктом $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$. Що стосується т. $A_{i_2,k+2}$ і $A_{i_2,k+3}$, то їх координати можуть бути знайдені шляхом розв'язання наступної системи рівнянь при фіксованому θ_{i_2} :

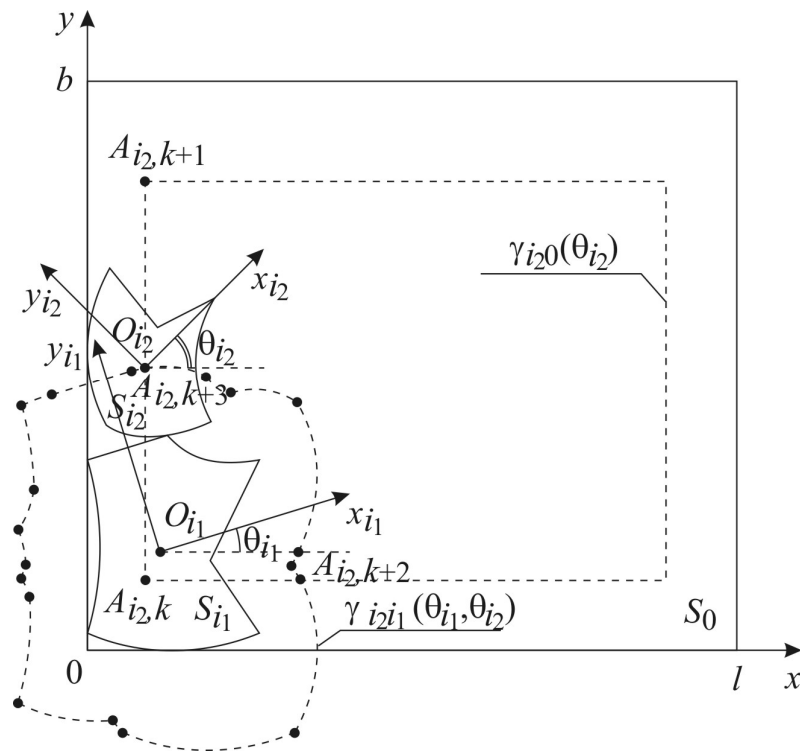


Рис. 2. Розміщення геометричного об'єкта $S_{i_2}(x_{i_2}, y_{i_2}, \theta_{i_2})$

$$\begin{cases} a_{i_2 i_1, pp+1, 1}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})x^2 + a_{i_2 i_1, pp+1, 2}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})xy + a_{i_2 i_1, pp+1, 3}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})y^2 + \\ + a_{i_2 i_1, pp+1, 4}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})x + a_{i_2 i_1, pp+1, 5}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})y + a_{i_2 i_1, pp+1, 6}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2}) = 0; \\ a_{i_2 0, q}(\theta_{i_2})x + b_{i_2 0, q}(\theta_{i_2})y + c_{i_2 0, q}(\theta_{i_2}) = 0; \end{cases} \quad (6)$$

де $a_{i_2 i_1, pp+1, r}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})$, $r = 1, \dots, 6$ – параметри квадратичної форми, що описує фрагмент між p та $(p+1)$ вершинами контуру $\gamma_{i_2 i_1}(\theta_{i_1}, \theta_{i_2})$ дотику об'єктів $S_{i_2}(x_{i_2}, y_{i_2}, \theta_{i_2})$ та $S_{i_1}(x_{i_1}, y_{i_1}, \theta_{i_1})$;

$a_{i_2 0, q}(\theta_{i_2})$, $b_{i_2 0, q}(\theta_{i_2})$, $c_{i_2 0, q}(\theta_{i_2})$ – параметри q -го ($q = 1, \dots, 4$) фрагменту контуру $\gamma_{i_2 0}(\theta_{i_2})$.

Очевидно, що для розміщення початку локальної системи координат об'єкта $S_{i_2}(x_{i_2}, y_{i_2}, \theta_{i_2})$ обираємо т. $A_{i_2, k+3}$.

Аналогічний підхід застосовується для розміщення об'єктів $S_{i_3}(x_{i_3}, y_{i_3}, \theta_{i_3})$, ..., $S_{i_N}(x_{i_N}, y_{i_N}, \theta_{i_N})$. Наступний крок – упорядкування об'єктів за параметром $\Delta l_{i_j}(\theta_{i_j})$, $j = 1, \dots, N$ (приріст цільової функції (2) при розміщенні геометричного об'єкта) і наступне їх розміщення відповідно до глибини оптимізації N_d .

Таким чином, застосування даного методу дозволить визначити локальний екстремум цільової функції (2) шляхом послідовного розв'язання систем рівнянь виду (5), (6), а також систем нелінійних рівнянь, які описують фрагменти контуру дотику відповідних геометричних об'єктів. Верхня оцінка складності даного методу має вигляд:

$$O = N_s \cdot N_d \cdot \sum_{i=1}^N n_i \cdot \left(2 + 3 \cdot \sum_{k=1}^{i-1} n_{\gamma_{ik}} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=k+1}^{i-1} n_{\gamma_{ij}} \cdot n_{\gamma_{ik}} \right); \quad (7)$$

де n_i – параметр дискретизації кута повороту i -го об'єкта;

$n_{\gamma_{ij}}$ – кількість фрагментів контуру, що описує дотик об'єктів $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ та $S_j(x_j, y_j, \theta_j)$;

$n_{\gamma_{ik}}$ – кількість фрагментів контуру, що описує дотик об'єктів $S_i(x_i, y_i, \theta_i)$ та $S_k(x_k, y_k, \theta_k)$.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В даній роботі розроблено модель та удосконалений метод оптимізації за групами змінних для розв'язання задач нерегулярного розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів у прямокутній області змінної довжини. Одержана верхня оцінка складності даного методу свідчить про доцільність його застосування до розв'язання практичних задач оптимізації. Подальші дослідження будуть спрямовані на здійснення комп'ютерного моделювання нерегулярного розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів у заданих областях.

1. Problems of geometric design: placement, coverage, partition and defining optimal routes / [Andronov V.A., Komyak V.M., Sobol A.N., Komyak V.V., Popova A.V.] // Годишник на технічний університет вв Варна – Варна: Технически ун.-т, 2013. – Т. 3. – С. 9-13.
2. Комяк В.М. Постановка задачі оптимального розміщення неорієнтованих плоских геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями / В.М. Комяк, О.М. Соболев, Ю.С. Чапля // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Вип. 91. – К.: КНУБА, 2013. – С. 127-130.
3. Комяк В.М. Математична модель оптимізації розміщення плоских неорієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями / В.М. Комяк, О.М. Соболев, Ю.С. Чапля // Вестник Херсонського національного технічного університета. – Херсон: ХНТУ, 2014. – Вип. 3(50). – С. 300-305.
4. Стоян Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев. – К.: Наукова думка, 1986. – 268 с.
5. Модель та метод оптимізації розміщення плоских орієнтованих геометричних об'єктів з кусочно-нелінійними границями / А.В. Попова // Сучасні проблеми моделювання. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Вип. 2. – С. 88-93.
6. Romanova T. Optimal clustering of a pair of irregular objects bounded by arcs and line segments / T. Romanova, J. Bennell, G. Scheithauer, Y. Stoyan, A. Pankratov // Proc. 10th ESICUP Meeting. – Lille (France). – 2013. – P. 22.

УДК 514.18

Е.В. Конопацкий
ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБОБЩЁННЫХ
ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

В работе предложены аналитические зависимости, которые позволяют вычислять обобщённые тригонометрические функции через координаты точек треугольника.

Ключевые слова: БН-исчисление, обобщённые тригонометрические функции, инвариант параллельного проецирования, координаты точек, метрический оператор трёх точек прямой.

Рис. 3. Лит.10.

Є.В. Конопацький
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ УЗАГАЛЬНЕНИХ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

В роботі запропоновані аналітичні залежності, які дозволяють розраховувати узагальнені тригонометричні функції через координати точок трикутника.

Ключові слова: БН-числення, узагальнені тригонометричні функції, інваріант паралельного проєціювання, координати точок, метричний оператор трьох точок прямої.

E. V. Konopatskiy
THE FEATURES OF CALCULATING GENERALIZED TRIGONOMETRIC FUNCTIONS

In this paper propose analytical relationships that allow us to calculate the generalized trigonometric functions of the coordinates of points in the triangle.

Key words: BN-calculation, generalized trigonometric functions, invariant parallel projection, coordinates of points, metric operator of three points on the line.

Постановка проблемы. В работах [1-3] были введены в прикладную геометрию обобщённые тригонометрические функции, которые являются инвариантом параллельного проецирования и позволяют делать по координатный расчёт не только для простого отношения трёх точек прямой, но и для отношения трёх точек прямой с изломом. В рамках БН-исчисления обобщённые тригонометрические функции могут эффективно использоваться:

- для определения дуг плоских кривых в нужной на практике параметризации и для перехода от одной параметризации к другой;
- для конструирования замкнутых плоских кривых с двумя осями симметрии с помощью угловых и радиальных параметризаций;
- для аналитического определения траектории движения рабочих органов телескопических механизмов;
- для задания многофокусных кривых;
- для координатной точки на топографической поверхности в геодезии;
- для разработки алгоритмов автоматической трассировки движения рабочих механизмов манипулятора, оптимизированных по затратам ресурсов...

Всё это позволило значительно расширить возможности БН-исчисления как аппарата моделирования геометрических многообразий. Все геометрические объекты, полученные в БН-исчислении, описываются с помощью точечных уравнений или расчётных алгоритмов на их основе. Однако точечные уравнения являются лишь символьной записью, которая позволяет осуществлять по координатный расчёт и на его основе переходить к вычислительным алгоритмам, понятным для ЭВМ. Поэтому для практического использования обобщённых тригонометрических функций с применением современной компьютерной техники необходимо иметь возможность их вычисления через координаты точек.

Анализ последних исследований. Обобщённые тригонометрические функции были введены в работах [1-3] на основе теоремы синусов, обобщение на многомерное пространство которой было предложено в работе [4]. Далее в работе [5] были исследованы некоторые свойства обобщённых тригонометрических функций, что обогатило инструментарий теории обобщённых тригонометрических функций и расширило возможности их использования. В этой работе были заложены основы обобщённой гониометрии. Примеры использования обобщённых тригонометрических функций для определения плоских кривых, а также для перехода от параметризации одного вида к другому, были рассмотрены в работах [6]. Параллельно были

исследованы возможности использования обобщенных тригонометрических функций для задания геометрических многообразий в плоскости общего положения [7]. Также была получена и доказана основная теорема обобщенных тригонометрических функций [8] и исследованы её свойства. Однако чем больше развивалась теория обобщенных тригонометрических, тем острее становился вопрос о способах вычисления обобщенных тригонометрических функций.

Все исследования по данной теме проводятся в рамках математического аппарата геометрического моделирования – БН-исчисление [9-10].

Формулировка целей статьи. Разработать способы вычисления обобщенных тригонометрических функций.

Основная часть. Для БН-исчисления (точечное исчисление Балюбы-Найдыша) важным является выбор параметра, который должен быть инвариантным относительно параллельного проецирования для обеспечения покоординатного расчёта. Таким свойством обладает простое отношение трёх точек прямой. Стандартные тригонометрические функции определяются углом, который при проецировании искажается, следовательно, стандартные тригонометрические функции не могут быть параметрами БН-исчисления.

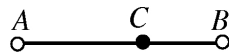


Рис. 1. Простое отношение трех точек прямой

Рассмотрим более подробно простое отношение трех точек прямой (рис. 1), которое в рамках аффинной геометрии является инвариантом параллельного проецирования и выражается следующим соотношением длин отрезков: $ABC = \frac{AC}{CB} = \frac{A-C}{C-B}$. Представим прямую ACB (рис. 1), как вырожденный треугольник, для которого угол при вершине C равен π .

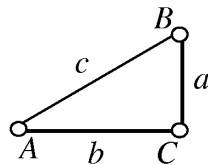


Рис. 2. Простое отношение трёх точек прямой с изломом

Если этот угол будет равен $\frac{\pi}{2}$ (рис. 2), то получим прямоугольный треугольник, в котором отношение отрезков определяется через стандартные тригонометрические функции: $ABC = \frac{AC}{CB} = \frac{b}{a} = ctgA = tgB$.

Аналогичным образом можно представить стандартные синус и косинус с помощью простого отношения трёх точек прямой с изломом: $CAB = \frac{CB}{BA} = \sin A$; $CBA = \frac{AC}{BA} = \cos A$.

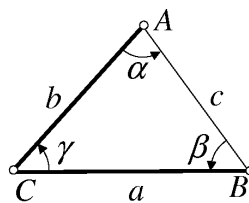


Рис. 3. К понятию обобщенных тригонометрических функций

Если угол γ при вершине C будет не кратным $\frac{\pi}{2}$ (рис. 3), то получим более общий случай, для которого простое отношение длин сторон треугольника определяет обобщенные

тригонометрические функции. Обобщенные тригонометрические функции определяются с помощью двух углов: аргумента и базового угла (аналог прямого угла в прямоугольном треугольнике). Так как в аффинной геометрии сумма углов любого треугольника равняется π , зафиксировав два угла из трех, тем самым фиксируем конкретный треугольник. Поскольку, в рамках аффинной геометрии треугольник является инвариантом параллельного проецирования, то и обобщенные тригонометрические функции также будут инвариантны относительно параллельного проецирования и могут быть использованы в качестве параметра в БН-исчислении. В общем случае обобщенные тригонометрические функции определяются через отношение длин сторон треугольника. Можно выразить любую обобщенную функцию через углы с помощью теоремы синусов.

$$\begin{aligned} CBA &= \frac{AC}{BA} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \sin_{\gamma} \beta = \cos_{\gamma} \alpha. \\ CAB &= \frac{CB}{BA} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \sin_{\gamma} \alpha = \cos_{\gamma} \beta. \\ BAC &= \frac{CB}{AC} = \frac{\sin_{\gamma} \alpha}{\cos_{\gamma} \alpha} = \operatorname{tg}_{\gamma} \alpha. \\ ABC &= \frac{AC}{CB} = \frac{\cos_{\gamma} \alpha}{\sin_{\gamma} \alpha} = \operatorname{ctg}_{\gamma} \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Используя геометрический смысл обобщенных тригонометрических функций, который выражается соотношениями (1), определим их с помощью метрического оператора трёх точек прямой БН-исчисления:

$$\begin{aligned} \sin_{\gamma} \alpha &= \frac{|CB|}{|BA|} = \sqrt{\frac{\sum_{BB}^C}{\sum_{AA}^B}}. \quad \cos_{\gamma} \alpha = \frac{|AC|}{|BA|} = \sqrt{\frac{\sum_{CC}^A}{\sum_{AA}^B}}. \\ \operatorname{tg}_{\gamma} \alpha &= \frac{|CB|}{|AC|} = \sqrt{\frac{\sum_{BB}^C}{\sum_{CC}^A}}. \quad \operatorname{ctg}_{\gamma} \alpha = \frac{|AC|}{|CB|} = \sqrt{\frac{\sum_{CC}^A}{\sum_{BB}^C}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Переходя от точечной к координатной форме для трёхмерного пространства получим:

$$\begin{aligned} \sin_{\gamma} \alpha &= \sqrt{\frac{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}. \\ \cos_{\gamma} \alpha &= \sqrt{\frac{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2}{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}. \\ \operatorname{tg}_{\gamma} \alpha &= \sqrt{\frac{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2}}. \\ \operatorname{ctg}_{\gamma} \alpha &= \sqrt{\frac{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2}{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для остальных углов треугольника ABC (рис. 3) можно получить аналогичные соотношения.

Как было сказано ранее, обобщённый синус был получен на основе теоремы синусов. Используя геометрический смысл метрического оператора трёх точек прямой [9], получим соотношения, связывающие обобщённые тригонометрические функции со стандартными косинусами углов треугольника.

$$\sin_{\gamma} \alpha = \frac{\cos \alpha \sum_{AB}^C}{\cos \gamma \sum_{BC}^A}, \quad \cos_{\gamma} \alpha = \frac{\cos \beta \sum_{AB}^C}{\cos \gamma \sum_{AC}^B},$$

$$tg_{\gamma} \alpha = \frac{\cos \alpha \sum_{AC}^B}{\cos \beta \sum_{BC}^A}, \quad ctg_{\gamma} \alpha = \frac{\cos \beta \sum_{BC}^A}{\cos \alpha \sum_{AC}^B},$$
(4)

где \sum_{BC}^A , \sum_{AC}^B и \sum_{AB}^C – метрические операторы трёх точек прямой.

Выводы. В статье получены аналитические зависимости, которые позволяют вычислять обобщённые тригонометрические функции через координаты точек, что позволяет использовать инвариантные свойства обобщённых тригонометрических функций в БН-исчислении для определения геометрических многообразий, поскольку они позволяют осуществить покоординатный расчёт и дают возможность перейти от символьной записи точечных уравнений к уравнениям параметрическим, которые определены в глобальной декартовой системе координат.

1. Геометричний сенс узагальнених тригонометричних функцій. / [Балюба І.Г., Верещага В.М., Конопацький Є.В., Шацький В.В.] // Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Т. 55. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – С.42-47.
2. Конопацький Є.В. Тригонометрические функции инвариантные относительно параллельного проецирования / Конопацький Є.В. // Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», 19-20 апр. 2013 г. Материалы и доклады в 3 ч. Ч.1. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – С.89-91.
3. Конопацький Є.В. Суть узагальнення стандартних тригонометричних функцій / Конопацький Є.В. // Матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності». Вип. 2. – К.: ДІЯ, 2013 р. – С.112-117.
4. Верещага В.М. Теорема синусів у багатовимірному просторі / Верещага В.М., Конопацький Є.В. // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 91. – К.: КНУБА, 2013. – С.131-136.
5. Конопацький Є.В. Дослідження властивостей узагальнених тригонометричних функцій / Конопацький Є.В. // Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Т. 56. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – С.263-267.
6. Балюба І.Г. Використання узагальнених тригонометричних функцій для визначення плоских кривих / Балюба І.Г., Верещага В.М., Конопацький Є.В. // Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Т. 57. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – С.119-124.
7. Конопацький Є.В. Особенности параметризации геометрических объектов в БН-исчислении / Конопацький Є.В. // Научная дискуссия: вопросы технических наук. № 8-9(11): сборник статей по материалам XIII-XIV международной заочной научно-практической конференции. – М., Изд. «Международный центр образования и науки», 2013. – С.12-16.
8. Конопацький Є.В. Основна теорема узагальнених тригонометричних функцій / Конопацький Є.В. // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць / МДПУ ім. Б. Хмельницького; гол. ред. кол. А.В. Найдиш. – Мелітополь: Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Вип. 3. – С.73-77.
9. Балюба І.Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении: диссертация на соискание научной степени доктора технических наук: 05.01.01 / Балюба Иван Григорьевич – Макеевка: МИСИ, 1995. – 227 с.
10. Найдиш В.М. Алгебра БН-исчисления / Найдиш В.М., Балюба І.Г., Верещага В.М. // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 90. – К.: КНУБА, 2012. – С.210-215.

Статья пришла в редакцию 17.04.2015.

УДК 681.121

І. В. Коробко, А. В. Писарець
ВПЛИВ ГАУСОВОЇ КРИВИЗНИ ПОВЕРХНІ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА І
ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ НА МЕТРОЛОГІЧНІ
ПОКАЗНИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ

Стаття направлена на дослідження впливу гідродинамічної картини потоку і геометричної форми тіл обтікання чутливих елементів гідродинамічних перетворювачів витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів і води на їх метрологічні характеристики. Отримані результати дозволяють ефективно застосовувати перетворювачі, без огляду на вимоги обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після приладів, у локальних місцях на технологічній мережі із врахуванням конкретних натурних умов організації вимірювання.

Ключові слова: витрата, вимірювання, прилади, асиметрія, похибки, гідравлічні опори.

Рис. 4. Літ. 4.

И. В. Коробко, А. В. Писарець
ВЛИЯНИЕ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО
ЭЛЕМЕНТА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА НА
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА

Статья направлена на исследование влияния гидродинамической картины потока и геометрической формы тел обтекания чувствительных элементов гидродинамических преобразователей расхода и количества топливно-энергетических ресурсов и воды на их метрологические характеристики. Полученные результаты позволяют эффективно применять преобразователи, невзирая на требования обязательного обеспечения прямых участков до и после приборов, в локальных местах на технологической сети с учетом конкретных натурных условий организации измерения.

Ключевые слова: расход, измерения, приборы, асимметрия, погрешности, гидравлические сопротивления.

V. Korobko , A. V. Pysarets
THE SENSITIVE ELEMENT SURFACE GAUSSIAN CURVATURE AND FLOW
HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS INFLUENCE ON FLOWMETERS
METROLOGICAL PERFORMANCES

Article aims to study the effect of hydrodynamic flow patterns and geometric shapes of bodies flow sensitive elements hydrodynamic flow transducers and the amount of energy and water resources in their metrological characteristics.

The obtained results allow us to effectively apply transducers, despite the requirements of the mandatory provision of direct and downstream devices in local areas on technology network to the specific conditions of the field measurements organization.

Keywords: flowrate, measurements, instruments, asymmetry, error, hydraulic resistance.

Вступ. Постановка проблеми. Оцінювання впливу неоднорідності рідинофазних потоків на точність вимірюваних перетворювачів витрати (ВПВ) рідин і газів, враховуючи складність та трудомісткість процесів натурних досліджень, доцільно здійснювати шляхом чисельного моделювання з використанням методів обчислювальної гідродинаміки на базі програмного комплексу *ANSYS*, в якому реалізовано метод кінцевих елементів і дозволяє з високою ймовірністю визначити проекції векторів швидкостей та розподіл тиску у дискретних точках потоку, як за поперечним перерізом, так і по його протяжності. Також слід зазначити, що в ряді випадків, щоб отримати чітку картину взаємодії вимірюваного середовища з чутливими елементами (ЧЕ) перетворювача витрати поставити натурний експеримент не представляється можливим. Тоді на допомогу і приходять комп'ютерне моделювання, завдяки якому можна проаналізувати метрологічні характеристики певної конструкції витратоміра.

Для вимірювання витрати паливно-енергетичних ресурсів з різною динамікою їх плинину застосовуються гідродинамічні (ГД) ВПВ, принцип дії яких базується на залежності переміщення або коливання ЧЕ, від величини гідродинамічного натиску потоку і, відповідно, витрати [1].

Постановка задачі. Для реалізації комп'ютерного моделювання гідродинамічної обстановки в корпусі ВПВ слід виконати такі завдання: створити геометричну модель приладу, накласти сітку на створену модель, призначити зони входу і виходу рідини крізь прилад, вибрати гідродинамічну модель вимірюваного середовища, обрати матеріал вимірюваного середовища з необхідними фізичними властивостями, призначити межові умови на вході, виконати ініціалізацію

обчислювального процесу і розпочати сам процес, оцінити отримані результати розподілу основних параметрів, зокрема швидкості, тиску, температури по витратовимірній ділянці [2].

Можливість застосування CFD-технологій для розрахунку метрологічних параметрів перетворювачів витрати нині тільки вивчається, і практично немає систематичних досліджень впливу моделей турбулентності на коректність передачі структури потоку у вимірювальному трубопроводі і точність розрахунку паспортних характеристик приладів.

Створення ефективних ВПВ рідини та газів з довершеними метрологічними характеристиками пов'язано із визначенням раціональних значень параметрів конструкції приладу за мінімізації втрат енергетичної складової потоку вимірюваного середовища.

Важливим напрямом оптимізації гідродинамічних перетворювачів витрати, який направлено на створення приладу з високими метрологічними характеристиками, є визначення раціональних геометричних форм тіл обтікання ЧЕ, що за мінімізації впливу на вимірюване середовище забезпечують високу точність реєстрації.

Оцінювання взаємодії плинного неоднорідного потоку і чутливих елементів різної просторової конфігурації.

Моделювання роботи перетворювача витрати гідродинамічного типу проведено з використанням програмного комплексу, який є універсальною програмною системою кінцево-елементного аналізу для розв'язання просторових задач механіки деформованого твердого тіла та конструкцій (включаючи нестационарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), завдань механіки рідини і газу.

Оцінювання взаємодії плинного неоднорідного потоку і ЧЕ різної просторової конфігурації та її вплив на паспортні характеристики приладу проводилися з перетворювачами, ЧЕ яких мають обтічні поверхні різної гаусової кривизни: нульової (циліндр) (рис. 1а), додатної (конус) (рис. 1б) та від'ємної (порожниста напівсфера) (рис. 1в). Для вказаних моделей проведено чисельні моделювання з визначенням похибок вимірювання в залежності від кута їх просторової орієнтації на технологічній мережі та відстані від місцевих гідравлічних опорів різної просторової та геометричної конфігурації: конфузор, дифузор, коліно з поворотом на $\pi/2$ рад, два коліна з поворотом на $\pi/2$ рад кожний і розміщені як в одній так і в різних площинах (просторове коліно).

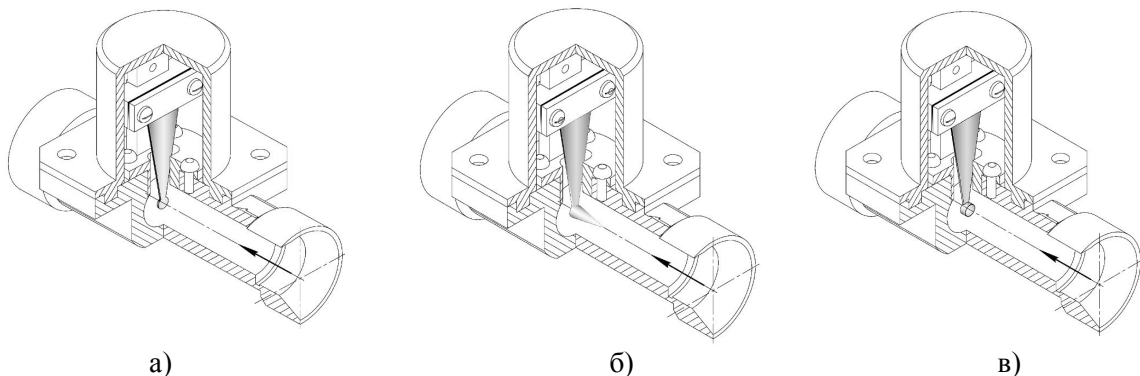


Рис. 1. Гідродинамічний перетворювач витрати з ЧЕ, що має обтічне тіло: а) – плоский диск; б) – конус, вершиною направлений назустріч потоку; в) – порожниста напівсфера зорієнтована порожниною проти потоку

Враховуючи сталість поперечного перерізу, оцінку точності перетворювача можна проводити шляхом знаходження ступеня невідповідності деформації ЧЕ, викликаній дією на нього модельного осесиметричного профілю Грегора, що описує розвинутий турбулентний потік у трубопроводі з круглим поперечним перерізом

$$\frac{v}{\bar{v}} = 1,1523 + 0,09211 \cdot \ln\left(1 - \frac{r}{R}\right) + 0,1858\Phi\left(\frac{r}{R}\right),$$

де v - швидкість в будь-якій точці перерізу циліндричної труби радіусом R на відстані r від її осі; \bar{v} - осереднена по перерізу швидкість потоку;

$$\Phi\left(\frac{r}{R}\right) = -0,5530347\left(\frac{r}{R}\right)^4 + 1,6066064\left(\frac{r}{R}\right)^3 - 1,8782031\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0,6044168\left(\frac{r}{R}\right) + 0,0026893.$$

Дослідження впливу неоднорідностей потоку на роботу перетворювача проводилися за оцінюванням величини похибок вимірювання, впливу на вимірюване середовище, що характеризується втратою тиску на приладі та значень, запропонованого в роботі, коефіцієнту ефективності, який комплексно відображає точність вимірювання і дію на потік [3]

$$K_{\text{еф}} = \frac{(1-\delta)}{\Delta p^2},$$

де δ - похибка реєстрації витрати;

Δp - втрата тиску потоку на перетворювачі.

При оцінюванні впливу асиметричності потоку на точність перетворювачів на вхідному перерізі модельної геометрії гідравлічного опору було відтворено епюру швидкостей, яка відповідає розподілу, що утворюється при проходженні потоком відповідного опору на певній відстані від початкового перерізу.

Оцінка впливу асиметрії потоку на роботу гідродинамічних перетворювачів. Проведені дослідження показали, що серед місцевих опорів досить значну неоднорідність потоку індукують просторові коліна (два коліна з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожний і розміщених у різних площинах) [4].

Оцінювання якісних і кількісних особливостей роботи приладу, викликаних асиметричністю потоку, проведено для перерізів по протяжності вимірювальної магістралі за чотирьох випадків просторової орієнтації перетворювача відносно його вертикальної вісі. Такі тестування проведені з визначенням комплексного критерію ефективності (рис. 2), похибок вимірювання (рис. 3) та втрати тиску (рис. 4).

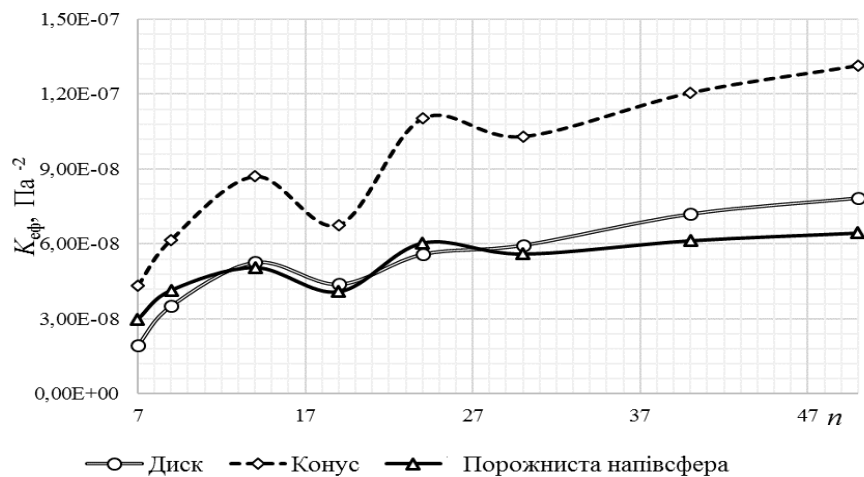
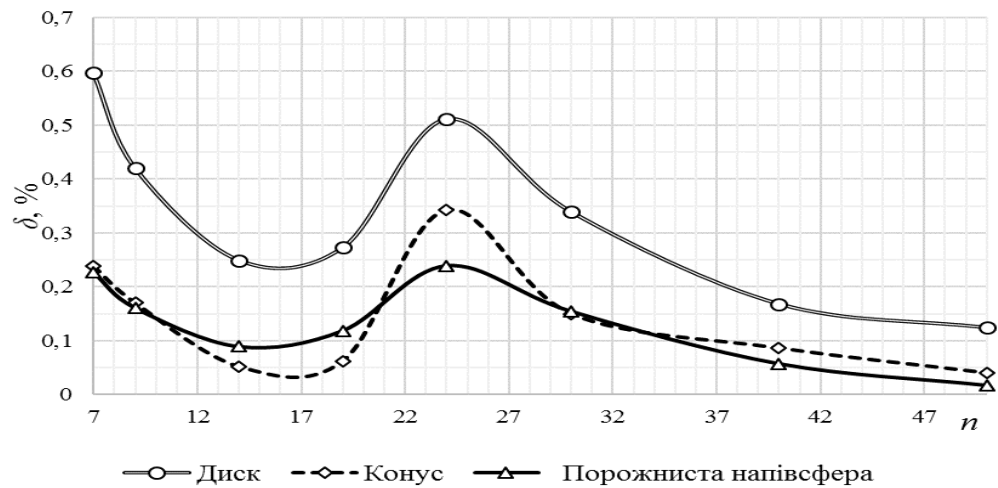
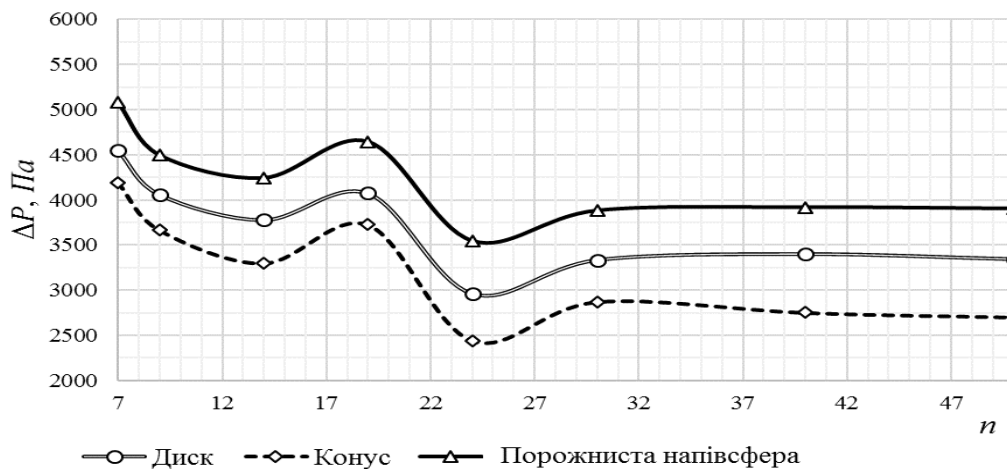


Рис. 2. Критерій ефективності при куті орієнтації приладу $\theta = 0$ рад

Аналіз отриманих результатів показує значну, за комплексним показником ефективності, перевагу, перед іншими, приладу з обтічним тілом просторової форми у вигляді конусу, вершиною спрямованого на зустріч потоку. Такі перетворювачі найменшим чином впливають на вимірюване середовище при близьких значеннях похибки вимірювання.

Досить чітко окреслюються місця найбільш раціонального розміщення перетворювача на технологічній магістралі відносно гідравлічного опору. Після 27-го перетину спостерігається різке зростання показника ефективності, при зменшенні величини похибки вимірювання. Зміна просторової орієнтації приладу відносно вертикальної вісі дає можливість досягти в поперечних перерізах по протяжності технологічної магістралі високу точність вимірювання за мінімального впливу на потік.

Рис. 3. Похибка при куті орієнтації приладу $\theta = 0$ радРис. 4. Втрата тиску при куті орієнтації приладу $\theta = 0$ рад

За аналогічною методикою здійснена оцінка впливу на метрологічні характеристики приладу асиметричності потоку, викликані коліном з поворотом на кут $\pi/2$ рад, двома колінами з поворотами на кут $\pi/2$ рад кожний і розміщених в одній площині, на паспортні характеристики перетворювачів, конфузора, дифузора, раптових розширення та звуження.

Висновки. Дослідження гідродинамічних витратомірів із чутливими елементами різних просторових форм, показали, що найкращими, за умов мінімальної похибки і впливу на вимірюване середовище, є прилади з обтічними тілами у формі конуса, направленою вершиною назустріч потоку. Отримані результати дають чітку картину місць локального розміщення приладів на технологічній мережі за умов максимальної точності і мінімальної дії на вимірюване середовище. Це дозволяє ефективно застосовувати перетворювачі, без огляду на вимоги обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після приладів, у локальних місцях на технологічній мережі із врахуванням конкретних натурних умов організації вимірювання.

1. Коробко І. В. Оптимізація вимірювальних перетворювачів витрати рідини гідродинамічного типу [Текст] / І. В. Коробко // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 91–96.
2. Гришанова І. А. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT [Текст]: підруч. для вузів / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с.
3. Коробко, І. В. Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів [Текст] / І. В. Коробко // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 111–117.
4. Коробко, І. В. Оцінка асиметрії потоку рідини при вимірюванні її витрати та кількості [Текст] / І. В. Коробко, Я. В. Волинська // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 91–98.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2015.

УДК 539.375

Т.А. Крадінова

Луцький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАСТИНИ З ПЕРІОДИЧНОЮ СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ТРІЩИН В УМОВАХ ДІЇ ДОВГОТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО РОЗТЯГУ І НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Розглянуто задачу про розтяг пластини з періодичною системою компланарних тріщин за звичайної температури. Знайдемо такий час $t = t_$ навантаження пластини, за досягнення якого кожна тріщина досягне критичної довжини $l = l_*$ і пластинка зруйнується.*

На основі узагальнення відомого енергетичного підходу, а також, враховуючи, що за великих і малих розмірів l тріщина поширюватиметься приблизно перпендикулярно до напрямку дії зусиль p , знаходимо формулу для визначення періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини в пластині послабленій періодичною системою прямолинійних тріщин.

Розраховано залишковий ресурс для пластини з полімерного композитного матеріалу з заданими характеристиками. Побудована графічна залежність залишкової довговічності пластини t_ від кута α_1 прикладання зовнішнього навантаження p .*

Ключові слова: пластини з періодичною системою компланарних тріщин, тріщини низькотемпературної повзучості, залишковий ресурс, період докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Т.А. Крадінова**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛАСТИНЫ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЛАНАРНЫХ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ.**

Рассмотрена задача о растяжение пластини с периодической системой компланарных трещин при обычной температуре. Найдем такое время $t = t_$ нагрузки пластини, по достижении которого каждая трещина достигнет критической длины $l = l_*$ и пластинка разрушится.*

На основе обобщения известного энергетического подхода, а также, учитывая, что при больших и малых размерах l трещина распространяется примерно перпендикулярно к направлению действия усилий p , находим формулу для определения периода докритического роста ползуче-усталостной трещины в пластине, ослабленной периодической системой прямолинейных трещин.

Расчитано остаточный ресурс для пластини из полимерного композитного материала с заданными характеристиками. Построена графическая зависимость остаточной долговечности пластини от угла приложения внешней нагрузки p .

Ключевые слова: пластини с периодической системой компланарных трещин, трещины низькотемпературной ползучести, остаточный ресурс, период докритического роста трещин низькотемпературной ползучести, коэффициент интенсивности напряжений.

T.A. Kradinova**A MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATING OF THE LIFETIME OF PLATES WITH A PERIODIC SYSTEM OF COPLANAR CRACKS IN CONDITIONS OF ACTION OF LONG-TERM STATIC TENSION AND LOW TEMPERATURE FIELD.**

A task is considered about tension of plates with the periodic system of coplanar cracks at an ordinary temperature. Will find such time $t = t_$ of loading of plate, for the achievement of that every crack will attain critical length $l = l_*$ and a plate will collapse.*

On the basis of generalization of the known power approach, and also, taking into account, that at large and small sizes a l crack will spread approximately athwart to direction of action of efforts of p , find a formula for determination of period of subcritical height of creeping-tireless crack in a plate weak by the periodic system of rectilinear cracks.

A remaining resource is expected for a plate from polymeric composite material with the set descriptions. Graphic dependence of remaining longevity of plate is built on the corner of appendix of the external loading.

Keywords: plates with the periodic system of coplanar cracks, cracks in the low-temperature creep, residual life, period to critical crack growth of low-temperature creep, the stress intensity factor.

Механіка руйнування добре розвинута для крихких та пружно-пластичних тіл під дією однократних статичних, динамічних, циклічних навантажень, а також з урахуванням дії водневих і корозійно-активних середовищ [1]. Але на даний час ще недостатньо досліджені задачі про

довготривале статичне навантаження елементів конструкцій з тріщинами, які є важливими для інженерної практики. Для бездефектних матеріалів вже отримано певні результати досліджень повзучості матеріалів, за якими прогнозували довготривалу міцність і довговічність елементів конструкцій [2,3].

Як свідчать результати натурних обстежень елементів конструкцій під час експлуатації, їх елементи містять в більшості випадків системи дефектів типу тріщин, що утворилися в результаті їх неякісного виготовлення або в процесі експлуатації [1, 7]. Відомо [7, 8], що за докритичного навантаження зразків з тріщинами, що виготовлені з пластичних матеріалів, тріщини підростають за короткий час на деяку довжину. Це призводить до неточностей у визначенні характеристик тріщиностійкості матеріалів [7, 8] і свідчить про те, що у випадку сповільненого або довготривалого статичного навантаження таке підростання буде суттєвим і спричинятиме руйнування. Втрата міцності таких елементів проходить шляхом поширення тріщин повзучості. Внаслідок цього тріщини поширюються за навантажень значно менших від критичних і конструкції руйнуються. Тому зроблена спроба побудувати математичну модель для визначення залишкового ресурсу пластин з системами тріщин за довготривалого статичного навантаження і низькотемпературного поля.

Розглянемо пластину, послаблену періодичною системою прямолінійних тріщин початкової довжини $2l_0$, розміщених вздовж прямої лінії на віддалі $2(h-l_0)$ одна від одної. Вважатимемо, що пластина розтягується у нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими довготривалими статичними зусиллями p (рис. 1), які напрямлені під кутом $\pi/2 - \alpha_1$ до лінії розміщення тріщин за звичайної температури, що викликає в зонах передруйнування біля їх вершин низькотемпературну повзучість, а отже відбувається поширення тріщин.

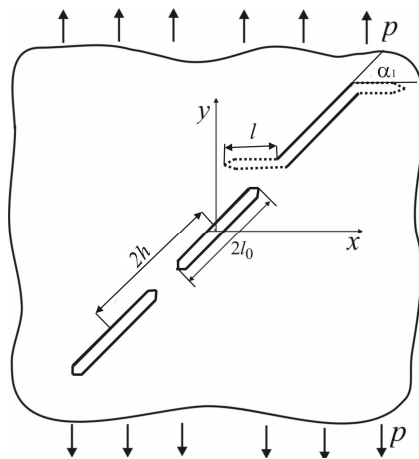


Рис.1. Схема навантаження пластини з періодичною системою тріщин.

Вважаємо, що всі тріщини знаходяться в однакових умовах навантаження і поширюватимуться під однаковим кутом α_{1*} на рівні віддалі l (рис. 1). Знайдемо такий час $t = t_*$ навантаження пластини, за досягнення якого кожна тріщина досягне критичної довжини $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Аналогічно, як і для розв'язання задач у випадку однієї, чи двох компланарних тріщин, застосуємо енергетичний підхід [3, 9], а також скористаємося відомою гіпотезою про те, що поширення тріщин повзучості проходитиме в напрямку максимально можливих їх швидкостей. Тоді математична модель зводиться до розв'язку системи диференціальних рівнянь

$$\frac{dl}{dt} = (\gamma_{fc} - \gamma_t)^{-1} \frac{\partial W_p}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left\{ (\gamma_{fc} - \gamma_t)^{-1} \frac{\partial W_p}{\partial t} \right\}_{\alpha_1 = \alpha_{1*}} = 0 \quad (2)$$

із заданими початковою і кінцевою умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*,$$

де $W_p(t)$ – частина роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування, яка генерується самою пластиною під час повзучості її матеріалу в стані розтягу; γ_t – питома робота пластичних деформацій в зоні передруйнування під час росту тріщини, а γ_{fC} – її критичне значення; α_{1*} – кут напрямку поширення тріщини.

З результатів розв'язання рівняння (2) випливає, що за великих і малих розмірів l тріщина поширюватиметься приблизно перпендикулярно до напрямку дії зусиль p . Тоді, враховуючи математичну модель для задачі з однією тріщиною [3, 9], період $t = t_*$ докритичного росту тріщини у випадку низькотемпературної повзучості в тонкостінних елементах конструкцій визначатиметься такими співвідношеннями

$$\frac{dl}{dt} \approx \frac{A_{2t} K_{CC}^{-2m} [K_I^{2m}(\alpha_{1*}, l) - K_{thc}^{2m}]}{1 - K_{CC}^{-2} K_I^2(\alpha_{1*}, l)} \quad (3)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad (K_I(\alpha_{1*}, l_*) = K_{CC}). \quad (4)$$

Тут $K_I(\alpha_{1*}, l)$ – КІН біля вершини тріщини в напрямку $\alpha_1 = \alpha_{1*}$; σ_{0f} – усереднене значення напружень в зоні передруйнування; A_{2t} , m , K_{thc} , K_{CC} – експериментальні характеристики низькотемпературної повзучості матеріалу.

Згідно до [13], величина

$$K_I(\alpha_1, l) = \sqrt{K_{I0}^2 + K_{I\infty}^2}, \quad (5)$$

де K_{I0} – значення КІН під час старту тріщини і за малого її підростання, тобто при $l \rightarrow 0$; $K_{I\infty}$ – значення КІН, коли тріщина далеко відійшла від свого початкового стану, тобто $l \gg l_0$.

В першому граничному випадку при $l \rightarrow 0$ отримаємо пластину послаблену періодичною системою прямолінійних тріщин початкової довжини $2l_0$, розміщених вздовж прямої під кутом α_1 до осі Ox на віддалі $2(h - l_0)$ одна від одної. Тоді, згідно до результатів праць [1], запишемо КІН:

$$K_{I0} = K_I^{(0)} \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha_1}{2} (1 + \cos \alpha_1) \left(1 + 0,051 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^4 \right) + \\ + K_{II}^{(0)} \frac{3}{2} \cos \frac{\alpha_1}{2} \sin \alpha_1 \left(1 + 0,060 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^2 + 0,064 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^4 \right), \quad (6)$$

де $K_I^{(0)} = p \sqrt{l_0} \cos^2 \alpha_1 f(\lambda)$; $\lambda = \frac{l_0}{h}$

$$K_{II}^{(0)} = p \sqrt{l_0} \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 f(\lambda);$$

$$f(\lambda) = \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{(1-\lambda)(4+(\pi^2-4)\lambda)}}.$$

У другому граничному випадку, при $l \gg l_0$ отримаємо пластину послаблену нескінченним рядом паралельних тріщин рівної довжини, які знаходяться на відстані $2h \sin \alpha_1$ одна від одної. Використовуючи результати праці [12], значення КІН для даного випадку запишемо так:

$$K_{I\infty} = p \sqrt{\pi l} \varepsilon \left(\left(1/\sqrt{\pi} \right) \left(1 + \frac{1}{2} \varepsilon + \frac{3}{8} \varepsilon^2 + \frac{5}{16} \varepsilon^3 + \frac{35}{128} \varepsilon^4 + \frac{63}{256} \varepsilon^5 + \frac{231}{1024} \varepsilon^6 \right) + \right. \\ \left. + 15,342 \varepsilon^7 - 47,020 \varepsilon^8 + 45,279 \varepsilon^9 - 14,225 \varepsilon^{10} \right) \quad (7)$$

де $\varepsilon = \frac{1}{1+\lambda_1}$; $\lambda_1 = \frac{l}{h \sin \alpha_1}$.

Підставляючи (6) і (7) у співвідношення (5), отримуємо остаточну формулу для визначення $K_I(\alpha_1, l)$:

$$K_I(\alpha_1, l) = p\sqrt{\pi l} \left\{ \left[\varepsilon \left(1/\sqrt{\pi} \right) \left(1 + \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{3}{8}\varepsilon^2 + \frac{5}{16}\varepsilon^3 + \frac{35}{128}\varepsilon^4 + \frac{63}{256}\varepsilon^5 + \frac{231}{1024}\varepsilon^6 \right) + 15,342\varepsilon^7 - 47,020\varepsilon^8 + 45,279\varepsilon^9 - 14,225\varepsilon^{10} \right]^2 + \frac{l_0 l^{-1} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \frac{\alpha_1}{2}}{(1-\lambda)(4+(\pi^2-4)\lambda)} \left[2 \cos \alpha_1 \cos^2 \frac{\alpha_1}{2} \left(1 + 0,051 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^4 \right) + 3 \sin^2 \alpha_1 \left(1 + 0,060 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^2 + 0,064 \left(\frac{2\alpha_1}{\pi} \right)^4 \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Інтегруючи (3) за умов (4), отримуємо формулу для визначення періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини в пластині послабленої періодичною системою прямолінійних тріщин (рис. 1)

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{1 - K_{CC}^{-2} K_I^2(\alpha_{1*}, l)}{A_{2t} K_{CC}^{-2m} [K_I^{2m}(\alpha_{1*}, l) - K_{thc}^{2m}]} dl, \quad (9)$$

де K_I визначається зі співвідношення (8).

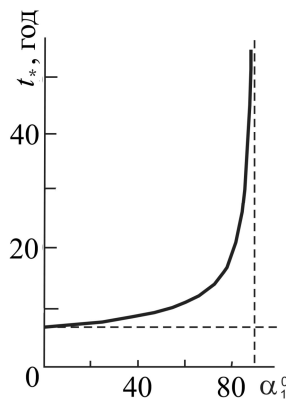


Рис. 2. Залежність залишкового ресурсу t_* пластини від кута α_1 орієнтації лінії розміщення тріщин до напрямку дії зовнішніх зусиль p

Розрахуємо тепер залишковий ресурс для пластини з полімерного композитного матеріалу [6] з такими характеристиками $m \approx 0,7$, $A_{2t} \approx 0,013$ м/год, $K_{CC} = 11,111$ МПа $\sqrt{м}$, $K_{thc} = 5,783$ МПа $\sqrt{м}$. Вважатимемо, що навантаження на пластину $p = 28,471$ МПа, початкова довжина тріщин $l_0 = 0,014$ м, а віддаль між ними $h = 0,05$ м.

У результаті обчислення інтеграла (9) з урахуванням (8) і приведених вище даних на рис. 2, побудована зміна залишкової довговічності пластини t_* від кута α_1 прикладання зовнішнього навантаження p . Як бачимо, за збільшення $\alpha_1 \rightarrow \pi/2$ залишковий ресурс $t_* \rightarrow \infty$.

1. Механика разрушения и прочность материалов: в 4 т. – К.: Наук. думка, 1988 – 1990. –Т. 1: Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, О. Е. Андрейків, В. З. Партон – К.: Наукова думка, 1988. – 488 с.
2. Лейн Г.Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
3. О. Е. Andreikiv, I,2 Yu. Ya. Matviiv,3 and T. A. Kradinova Determination of the lifetime of plates with a system of cracks under the long-term static tension in a low-temperature field// Journal of Mathematical Sciences. – Vol. 187. – No. 6. – December, 2012. – p. 716-725
4. Андрейків О.Є., Сас Н.Б. Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів. 2006. №2. – С. 62-68.
5. Kaminsky A.A. Subcritical crack growth in polymer composite materials under creep // Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity: Selected papers from the 8th Int.Conf. on Fracture (ICF 8), Kyiv, Ukraine, 8-14 June 1993. – Pergamon, 1994. – P. 513-520.

6. *Fuji A. and Kitagawa M.* A Comparison of Creep Crack Growth Behaviour in Nickel Based Super Alloy with Low Alloy Steel. // *Ibid.* – P. 487-495.
7. Панасюк В. В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В. В. Панасюк, О. Е. Андрейків, С. Е. Ковчик – К.: Наук. думка, 1977. – 488 с
8. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4т./ Под общей редакцией Панасюка В.В.* – Киев: Наук. думка, 1988. – Т.2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Саврук М.П.– 1988. – С. 74-81.
9. Andreikiv O. E. Evaluation of the durability of cracked plates under the conditions of long-term static loading and local creep / O. E. Andreikiv, V.R. Skal's'kyi, Yu. Ya. Matviiv, T.A. Kradinova // *Materials Science.* – 2012. – Vol. 48. – Issue 1. – July. – P. 36–45.
10. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
11. Крадінова Т. А. Визначення залишкового ресурсу пластини з системою компланарних тріщин за довготривалого статичного навантаження / Т. А. Крадінова // *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка")*. – Випуск 33. – 2011. – С. 89–91.
12. *Stress Intensity Factors Handbook / Murakami Yu. et al., editor.* – Pergamon Press, 1987. – 587 p.
13. Андрейків О. Є. Циклічна міцність тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами / О. Є. Андрейків, М. Б. Банахевич, М. Б. Кіт // *Доповіді НАН України.* – 2009. – № 7. – С. 56–62.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2015.

УДК 514.18

А.А. Крысько

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ТЕХНИЧЕСКИХ
ФОРМ МЕТОДАМИ БН-ИСЧИСЛЕНИЯ**

С помощью математического аппарата БН-исчисления разработан вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм с учетом возможности его дальнейшего программирования и создания компьютерных моделей таких поверхностей.

Ключевые слова: универсальный расчетный алгоритм, геометрическая модель, БН-исчисление, несовершенства геометрической формы, тонкостенные оболочки, технические формы.

Рис. 2. Табл. 0. Лит. 5.

О.А.Крысько

**РОЗРАХУНКОВИЙ АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
ДІЙСНОЇ ПОВЕРХНІ ТОНКОСТІНИХ ОБОЛОНОК ТЕХНІЧНИХ ФОРМ МЕТОДАМИ
БН-ЧИСЛЕННЯ**

За допомогою математичного апарату БН-числення розроблений обчислювальний алгоритм формування геометричних моделей дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм з врахуванням можливості його подальшого програмування і створення комп'ютерних моделей таких поверхонь.

Ключові слова: універсальний розрахунковий алгоритм, геометрична модель, БН-числення, недосконалість геометричної форми, тонкостінні оболонки, технічні форми.

А.А. Krysko

**COMPUTATIONAL ALGORITHM OF FORMING OF GEOMETRICAL MODELS OF
ACTUAL SURFACE OF THE THIN-WALLED SHELLS OF TECHNICAL FORMS BY
METHODS OF BN-CALCULATION**

By a mathematical apparatus BN-calculation the computational algorithm of forming of geometrical models of actual surface of the thin-walled shells of technical forms is developed taking into account possibility of his further programming and creation of computer models of such surfaces.

Keywords: universal calculation algorithm, geometrical model, BN-calculation, defects of geometrical form, thin-walled shells, technical forms.

Постановка проблемы. При проектировании тонкостенной оболочки инженерного сооружения задаются ее формой и размерами. Изготовленная конструкция вследствие производственных погрешностей всегда будет отличаться от конструкции, заданной проектом, что может привести к тому, что изготовленная конструкция будет работать иначе, чем предполагалось расчетом, или перестанет удовлетворять требованиям эксплуатации. В процессе эксплуатации подобных сооружений геометрия оболочки также претерпевает изменения, что может негативно повлиять на дальнейшую работу конструкции. В связи с этим возникает необходимость в изучении влияния искажения геометрической формы тонкостенных оболочек технических форм на их прочность и устойчивость.

Для прогнозирования влияния несовершенств геометрической формы на прочность и устойчивость такой оболочки, автором разработан вычислительный алгоритм, формирующий геометрическую модель тонкостенной оболочки инженерного сооружения с учётом несовершенств геометрической формы. Такая модель позволит моделировать любые изменения геометрии тонкостенной оболочки инженерного сооружения.

Анализ последних исследований. Исследования ведущих ученых по моделированию несовершенств геометрической формы тонкостенных оболочек инженерных сооружений были проанализированы авторами в работе [1]. Но проведенные ранее научные исследования в этой области не позволяют оценить влияние этих несовершенств на всю конструкцию в целом, что и было показано в [1].

Для геометрического моделирования конструкций тонкостенных оболочек инженерных сооружений автор использует математический аппарат – БН-исчисление [2]. В БН-исчислении был разработан метод подвижного симплекса [3], который позволяет достаточно просто

конструировать геометрические формы любой сложности, учитывая их свойства. На основе метода подвижного симплекса [3], предложен универсальный алгоритм [4], позволяющий определить геометрическую модель тонкостенной оболочки инженерного сооружения с учётом несовершенств геометрической формы. Однако этот алгоритм был предложен в виде последовательности точечных уравнений, которые представляют собой символьную запись. Поэтому возникает необходимость преобразования предложенного ранее универсального алгоритма [4] в вычислительный алгоритм, для дальнейшего использования при непосредственном создании программного кода.

Постановка задач. Разработать вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм с учетом возможности его дальнейшего программирования и создания компьютерных моделей таких поверхностей.

Основная часть. Инженерные сооружения, находящиеся в эксплуатации, подвергаются мониторингу с периодичностью, установленной государственными стандартами, во время которого измеряется, в том числе, измерение отклонений геометрии конструкций от заданной проектом. Для этого наряду с традиционными инструментами (лазерная или обычная рулетка, отвес, измерительное колесо, тахеометр, нивелир и т.д.) используются более современная технология наземного лазерного сканирования (НЛС).

При проведении измерений с помощью традиционных инструментов сооружение условно разделяется по вертикали на несколько поясов, на уровне которых измеряется отклонение конструкции от образующей. Таким образом, исходные данные для построения геометрической модели тонкостенной оболочки инженерного сооружения состоят из геометрических характеристик конструкции, количества поясов, количества точек в каждом поясе и значений отклонений в этих точках от образующей. Однако, для построения геометрической модели в БН-исчислении, необходимо получить массив точек, т.е. координаты точек вместо отклонений. Следует иметь в виду, что переход от отклонений к координатам точек поверхности напрямую зависит от первоначальной геометрической формы сооружения. В данной работе рассмотрим определение координат точек поверхности через отклонения на примере вертикального стального резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов.

Для определения точек на поверхности резервуара (рис. 1) принимаем следующие обозначения точек: $A_{i,j}$, где i – порядковый номер опорного контура, изменяющийся от 1 до m ; j – порядковый номер точки на опорном контуре, изменяющийся от 1 до n . Для упрощения расчетов принимаем количество точек в каждом поясе одинаковым, причем точки располагаются равномерно.

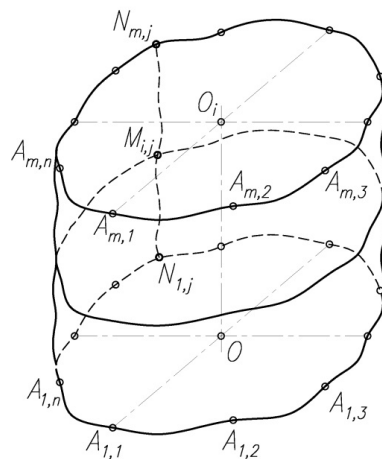


Рис. 1. Геометрическая схема поверхности резервуара с несовершенствами

Для координации точек на поверхности резервуара необходимо ввести систему координат. Идеальной поверхностью стенки резервуара является цилиндр с окружностью в основании. Как известно, оси окружности перпендикулярны по отношению одна к другой. Исходя из этого оптимальным для решения этой задачи будет принять прямоугольную систему координат с началом в точке O (рис. 1). Тогда оси x и y будут совпадать с осями окружности (рис. 2), а за ось z примем прямую OO_i (рис. 1).

Сформируем вычислительный алгоритм формирования геометрической модели конструкции тонкостенной оболочек инженерного сооружения с учётом несовершенств геометрической формы методами БН-исчисления.

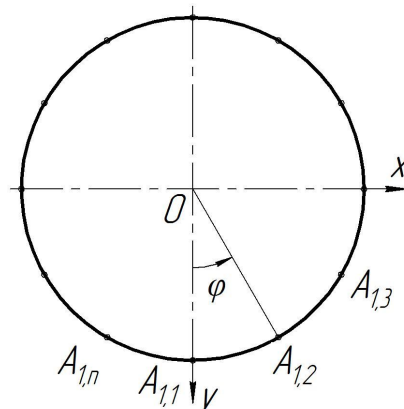


Рис. 2. Основание цилиндрической поверхности резервуара

1. Для начала необходимо получить исходные данные для геометрического моделирования, которыми являются координаты точек на поверхности резервуара, с помощью данных, полученных в результате обследования резервуара (высота резервуара, его радиус и отклонения от вертикальной стенки).

1.1. Вводим: высоту резервуара h , радиус резервуара R , количество поясов k , количество точек в каждом поясе n и массив отклонений от вертикальной стенки $\delta_{i,j}$.

1.2. Определяем количество опорных контуров по формуле: $m = k + 1$, где k – количество поясов.

1.3. Координаты $x_{A_{i,j}}$ и $y_{A_{i,j}}$ определим с помощью радиуса резервуара и таблицы отклонений стенки резервуара от вертикали по формулам:

$$x_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \sin \frac{2\pi}{n}; \quad y_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \cos \frac{2\pi}{n}. \quad (1)$$

1.4. Определяем массив координат $z_{i,j}$ по формуле: $z_{i,j} = \frac{i}{m} h$, из расчёта, что в каждом i – м слое координата $z_{i,j}$ является одинаковой. Т.е. $z_{i,j} = z_{i,j+1} = \dots = z_{i,n}$.

В результате получим три двумерных массива соответственно для координат точек $x_{A_{i,j}}$, $y_{A_{i,j}}$ и $z_{A_{i,j}}$.

При проведении измерений с помощью технологии наземного лазерного сканирования (НЛС) результатом является цифровая модель действительной поверхности тонкостенной оболочки технической формы [5]. Таким образом, в этом случае первая часть исключается из алгоритма за ненадобностью.

2. Алгоритм формирования линий опорного контура следующий:

2.1. Формируем цикл для i от 1 до m .

2.2. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+1}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+1}| = \sqrt{(x_{A_{i,j+1}} - x_{A_{i,j}})^2 + (y_{A_{i,j+1}} - y_{A_{i,j}})^2 + (z_{A_{i,j+1}} - z_{A_{i,j}})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Принимаем $A_{i,n+1} = A_{i,1}$.

$|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|$ определяем из этого же пункта сдвигом на единицу.

2.3. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+2}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+2}| = \sqrt{(x_{A_{i,j+2}} - x_{A_{i,j}})^2 + (y_{A_{i,j+2}} - y_{A_{i,j}})^2 + (z_{A_{i,j+2}} - z_{A_{i,j}})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Принимаем $A_{i,n+2} = A_{i,2}$.

2.4. Определяем массив точек $B_{i,j+1}$:

$$\begin{cases} x_{B_{i,j+1}} = (x_{A_{i,j+2}} - x_{A_{i,j}}) \frac{|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + x_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n; \\ y_{B_{i,j+1}} = (y_{A_{i,j+2}} - y_{A_{i,j}}) \frac{|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + y_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n; \\ z_{B_{i,j+1}} = (z_{A_{i,j+2}} - z_{A_{i,j}}) \frac{|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + z_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (4)$$

Принимаем $x_{B_{i,n+1}} = x_{B_{i,1}}$; $y_{B_{i,n+1}} = y_{B_{i,1}}$; $z_{B_{i,n+1}} = z_{B_{i,1}}$.

2.5. Определяем массив точек $C_{i,j+1}$:

$$\begin{cases} x_{C_{i,j+1}} = (x_{A_{i,j}} - x_{A_{i,j+2}}) \frac{|A_{i,j}A_{i,j+1}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + x_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n; \\ y_{C_{i,j+1}} = (y_{A_{i,j}} - y_{A_{i,j+2}}) \frac{|A_{i,j}A_{i,j+1}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + y_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n; \\ z_{C_{i,j+1}} = (z_{A_{i,j}} - z_{A_{i,j+2}}) \frac{|A_{i,j}A_{i,j+1}|}{2|A_{i,j}A_{i,j+2}|} + z_{A_{i,j+1}}, & j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (5)$$

Принимаем $x_{C_{i,n+1}} = x_{C_{i,1}}$; $y_{C_{i,n+1}} = y_{C_{i,1}}$; $z_{C_{i,n+1}} = z_{C_{i,1}}$.

2.6. Определяем дуги линий i -го опорного контура:

$$\begin{cases} x_{N_{i,j}} = x_{A_{i,j}} \bar{u}^3 + 3x_{B_{i,j}} \bar{u}^2 u + 3x_{C_{i,j}} u^2 \bar{u} + x_{A_{i,j+1}} u^3, & j = 1, 2, \dots, n; \\ y_{N_{i,j}} = y_{A_{i,j}} \bar{u}^3 + 3y_{B_{i,j}} \bar{u}^2 u + 3y_{C_{i,j}} u^2 \bar{u} + y_{A_{i,j+1}} u^3, & j = 1, 2, \dots, n; \\ z_{N_{i,j}} = z_{A_{i,j}} \bar{u}^3 + 3z_{B_{i,j}} \bar{u}^2 u + 3z_{C_{i,j}} u^2 \bar{u} + z_{A_{i,j+1}} u^3, & j = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (6)$$

где $\bar{u} = 1 - u$; $0 \leq u \leq 1$.

2.7. Увеличиваем i на 1 и возвращаемся к пункту 2.1.

3. Алгоритм формирования образующих линий:

3.1. Формируем цикл для j от 1 до n .

3.2. Определяем длины отрезков:

$$\begin{aligned} |N_{i,j}N_{i+1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i+1,j}} - x_{N_{i,j}})^2 + (y_{N_{i+1,j}} - y_{N_{i,j}})^2 + (z_{N_{i+1,j}} - z_{N_{i,j}})^2}, \\ |N_{i-1,j}N_{i+1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i+1,j}} - x_{N_{i-1,j}})^2 + (y_{N_{i+1,j}} - y_{N_{i-1,j}})^2 + (z_{N_{i+1,j}} - z_{N_{i-1,j}})^2}, \\ |N_{i,j}N_{i-1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i-1,j}} - x_{N_{i,j}})^2 + (y_{N_{i-1,j}} - y_{N_{i,j}})^2 + (z_{N_{i-1,j}} - z_{N_{i,j}})^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

3.3. Определяем точки $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$:

$$\begin{cases} x_{P_{i,j}} = (x_{N_{i+1,j}} - x_{N_{i-1,j}}) \frac{|N_{i,j}N_{i+1,j}|}{2|N_{i-1,j}N_{i+1,j}|} + x_{N_{i,j}}, & i = 2, 3, \dots, m-1. \\ y_{P_{i,j}} = (y_{N_{i+1,j}} - y_{N_{i-1,j}}) \frac{|N_{i,j}N_{i+1,j}|}{2|N_{i-1,j}N_{i+1,j}|} + y_{N_{i,j}}, & i = 2, 3, \dots, m-1. \\ z_{P_{i,j}} = (z_{N_{i+1,j}} - z_{N_{i-1,j}}) \frac{|N_{i,j}N_{i+1,j}|}{2|N_{i-1,j}N_{i+1,j}|} + z_{N_{i,j}}, & i = 2, 3, \dots, m-1. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{Q_{i,j}} = \left(x_{N_{i-1,j}} - x_{N_{i+1,j}} \right) \frac{|N_{i,j} N_{i-1,j}|}{2|N_{i-1,j} N_{i+1,j}|} + x_{N_{i,j}}, i = 2, 3, \dots, m-1. \\ y_{Q_{i,j}} = \left(y_{N_{i-1,j}} - y_{N_{i+1,j}} \right) \frac{|N_{i,j} N_{i-1,j}|}{2|N_{i-1,j} N_{i+1,j}|} + y_{N_{i,j}}, i = 2, 3, \dots, m-1. \\ z_{Q_{i,j}} = \left(z_{N_{i-1,j}} - z_{N_{i+1,j}} \right) \frac{|N_{i,j} N_{i-1,j}|}{2|N_{i-1,j} N_{i+1,j}|} + z_{N_{i,j}}, i = 2, 3, \dots, m-1. \end{cases}$$

3.4. Определяем дуги обвода для первого и последнего поясов:

$$\begin{cases} x_{M_{1,j}} = x_{N_{1,j}} \bar{v}^2 + 2x_{Q_{2,j}} v\bar{v} + x_{N_{2,j}} v^2, \\ y_{M_{1,j}} = y_{N_{1,j}} \bar{v}^2 + 2y_{Q_{2,j}} v\bar{v} + y_{N_{2,j}} v^2, \\ z_{M_{1,j}} = z_{N_{1,j}} \bar{v}^2 + 2z_{Q_{2,j}} v\bar{v} + z_{N_{2,j}} v^2. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_{M_{m,j}} = x_{N_{m-1,j}} \bar{v}^2 + 2x_{P_{m-1,j}} v\bar{v} + x_{N_{m,j}} v^2, \\ y_{M_{m,j}} = y_{N_{m-1,j}} \bar{v}^2 + 2y_{P_{m-1,j}} v\bar{v} + y_{N_{m,j}} v^2, \\ z_{M_{m,j}} = z_{N_{m-1,j}} \bar{v}^2 + 2z_{P_{m-1,j}} v\bar{v} + z_{N_{m,j}} v^2. \end{cases}$$

3.5. Формируем дуги образующих линий для промежуточных поясов:

$$\begin{cases} x_{M_{i,j}} = x_{N_{i,j}} \bar{v}^3 + 3x_{P_{i,j}} \bar{v}^2 v + 3x_{Q_{i,j}} v^2 \bar{v} + x_{N_{i+1,j}} v^3, \quad i = 2, 3, \dots, m-2; \\ y_{M_{i,j}} = y_{N_{i,j}} \bar{v}^3 + 3y_{P_{i,j}} \bar{v}^2 v + 3y_{Q_{i,j}} v^2 \bar{v} + y_{N_{i+1,j}} v^3, \quad i = 2, 3, \dots, m-2; \\ z_{M_{i,j}} = z_{N_{i,j}} \bar{v}^3 + 3z_{P_{i,j}} \bar{v}^2 v + 3z_{Q_{i,j}} v^2 \bar{v} + z_{N_{i+1,j}} v^3, \quad i = 2, 3, \dots, m-2, \end{cases} \quad (10)$$

где $\bar{v} = 1 - v$; $0 \leq v \leq 1$.

3.6. Увеличиваем значение j на 1 и возвращаемся к пункту 3.1.

Выводы. Разработан вычислительный алгоритм формирования геометрической модели конструкции тонкостенной оболочки инженерного сооружения с учётом несовершенств геометрической формы методами БН-исчисления. Данный алгоритм позволяет создать программу, на основе которой, можно получить компьютерные модели таких поверхностей. Что в свою очередь, позволяет использовать их в системах автоматического проектирования для прогнозирования влияния геометрических несовершенств на прочность и устойчивость такой оболочки, а также моделирования любых изменений геометрии тонкостенной оболочки инженерного сооружения.

1. Конопацький Є.В. Геометричні передумови моделювання дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм методами БН-числення / Конопацький Є.В., Крисько О.А. // Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Математика. Геометрія. Інформатика / гол. ред. кол. А.В. Найдиш. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014.– Т.1. – С.118-125.
2. Балюба И.Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении: дисс...доктора техн. наук: 05.01.01 / Балюба Иван Григорьевич – Макеевка: МИСИ, 1995. – 227 с.
3. Давыденко И.П. Конструирование поверхностей пространственных форм методом подвижного симплекса: Дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Давыденко Иван Петрович. – Макеевка, 2012. – 186 с.
4. Крисько О.А. Геометричне моделювання дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм / Крисько О.А., Найдиш А.В., Спірінцев Д.В. // Вісник Херсонського національного технічного університету. / гол. ред. кол. Бардачов Ю.М. – Херсон-2014. – С. 594-597.
5. Крисько О.А. Обработка данных отриманих НЛС для створення геометричної моделі дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм / Крисько О.А. // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць / МДПУ ім. Б. Хмельницького; гол. ред. кол. А.В. Найдиш. – Мелітополь: Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Вип. 2. – С.51-56.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2015

С.І. Літницький
НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОІДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ
КАРКАСОМ ТВІРНИХ

Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом твірних. В якості апроксимуючої осі коноїда шукали таку пряму, для якої відстань до заданих твірних є мінімальною. Проаналізована робота алгоритму на прикладі десяти різних коноїдів загального вигляду, представлених дискретним каркасом твірних.

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

Рис. 5. Літ. 1.

С.И. Литницкий
ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСИ КОНОИДА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО
ДИСКРЕТНЫМ КАРКАСОМ ОБРАЗУЮЩИХ

Разработан алгоритм приближенного определения оси коноида, представленного дискретным каркасом образующих. В качестве аппроксимирующей оси коноида искали такую прямую, для которой расстояние к заданным образующим является минимальным. Проанализирована работа алгоритма на примере десяти разных коноидов общего вида, представленных дискретным каркасом образующих.

Ключевые слова: ось коноида, дискретный каркас, образующая.

S.I. Litnitskiy
AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT
LINES

The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a lane. Conoid is created by straight lines. The axis area possible location was founded. After that the approximate conoid axis with the minimal length to straight lines was defined. The algorithm accuracy was analyzed by calculation length from approximate conoid axis to straight lines, angle and length between approximate axis and real one. For algorithm accuracy analyzing were used ten different conoids.

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Вступ. На коноїді, представленому дискретним каркасом твірних, можна побудувати безліч плоских і просторових дискретно представлених напрямних і, виконавши їхню сплайн-інтерполяцію, отримати апроксимуючі континуально задані напрямні. Загущуючи в точках напрямної твірні, які будуть паралельні площині паралелізму коноїда, отримуємо лінійчасту дискретно представлену твірною поверхню. Ці твірні можуть і не проходити через пряму направляючу (вісь коноїда [1]), тому поверхня більше не буде коноїдом. Якщо ж з певним наближенням вдасться визначити вісь коноїда, то вона разом з криволінійною напрямною дозволить отримати апроксимуючий континуально заданий коноїд (рис. 1).

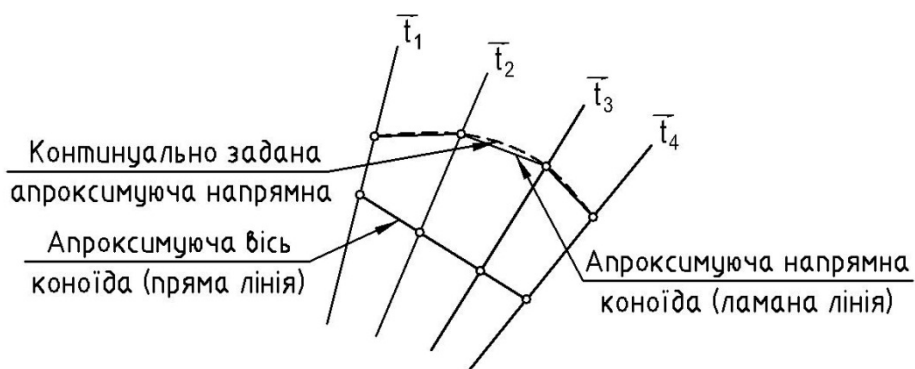


Рис. 1. До побудови апроксимуючого коноїда

Аналіз останніх досліджень. Наскільки відомо автору з літературних джерел, досі це питання в такому аспекті ніким не розглядалося.

Формулювання цілей статті. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом твірних.

Основна частина. Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1]. Тому в даному алгоритмі будемо шукати таку пряму, для якої сума відстаней до твірних буде мінімальною.

Нехай заданий впорядкований каркас твірних коноїда. Тоді алгоритм наближеного визначення осі коноїда складається з таких дій.

1. Перевіряємо, чи можна вважати задані твірні такими, що належать прямому коноїду. Для цього будемо спільні перпендикуляри між сусідніми твірними. Якщо усі перпендикуляри утворюють одну пряму, то досліджувана поверхня є прямим коноїдом, для якого ця пряма і є його віссю. Якщо описана вище умова не виконується, то переходимо до наступних пунктів алгоритму.

2. Шукаємо область розташування осі коноїда. Для цього призначаємо у просторі довільну початкову точку. Проводимо через неї площину, перпендикулярну до площини паралелізму. Визначаємо координати точок, в яких твірні перетнуть площину. З'єднуємо суміжні точки прямими. Обчислюємо суму кутів, які утворюють суміжні прямі (рис. 2). Після цього площина, побудована в довільній початковій точці, переміщується паралельно сама собі в обох напрямках з певним кроком (рис. 3). Крок задається залежно від змістовної суті поставленої задачі. В кожному випадку розташування площин визначається сума вище згаданих кутів. Якщо побудувати графік залежності значення суми цих кутів від накопиченої відстані між площинами, то, як показали обчислювальні експерименти, на ньому буде один або три локальних екстремуми, тобто значення суми кутів після монотонного спадання почне зростати або після зростання – спадати. Аналогічні дії були виконані для континуально заданих коноїдів, з відомими рівняннями. При цьому було виявлено, що локальні екстремуми, виникають у тому випадку, коли площина наближається до точок, в яких вісь коноїда перетинає задані твірні. Тому процес паралельного переміщення площин припиняється тоді, коли отримані координати одного з трьох локальних екстремумів. Фіксуємо координати площини, які відповідають цьому екстремуму. Ця площина перетинає вісь коноїда або знаходиться неподалік від неї. У випадку трьох локальних екстремумів, перший і третій екстремум є відповідно початком і кінцем області, в якій розташована вісь коноїда, тому найближче до осі коноїда знаходиться площина, яка відповідає другому за рахунком екстремуму (рис. 4, а).

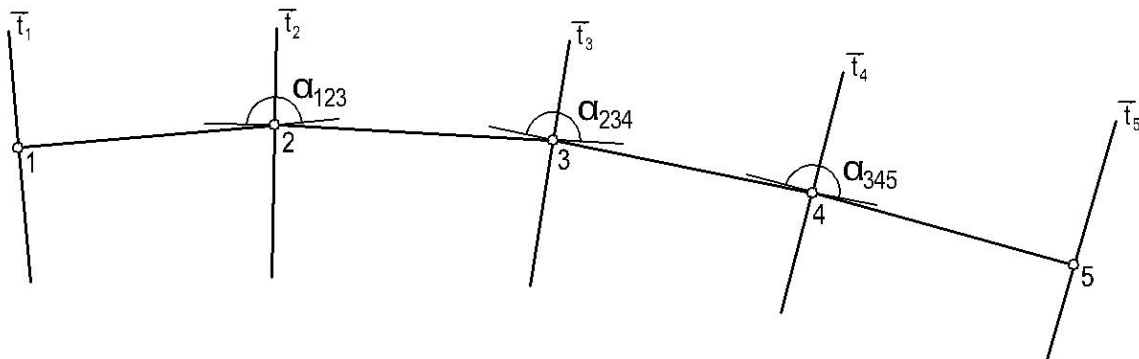


Рис. 2. До обчислення суми кутів, які утворюють сусідні відрізки

На рис. 4, а показаний приклад графіку з трьома локальними екстремумами (отриманий для поверхні, яка описується параметричними рівняннями $x = v - \frac{v^3}{3}$,

$y = 0,2\left(v - \frac{v^3}{3}\right) + u\left(v^2 - 0,2\left(v - \frac{v^3}{3}\right)\right)$, $z = 0,2\left(v - \frac{v^3}{3}\right) + u\left(\frac{3}{2}v + 1 - 0,2\left(v - \frac{v^3}{3}\right)\right)$), а на рис. 3, б – з

одним локальним екстремумом (отриманий для поверхні, яка описується параметричними

рівняннями $x = v - \frac{v^3}{3}$, $y = 0,7\left(v - \frac{v^3}{3}\right) + u\left(v^2 - 0,7\left(v - \frac{v^3}{3}\right)\right)$,

$z = 0,3\left(v - \frac{v^3}{3}\right) + u\left(\frac{3}{2}v + 1 - 0,3\left(v - \frac{v^3}{3}\right)\right)$),).

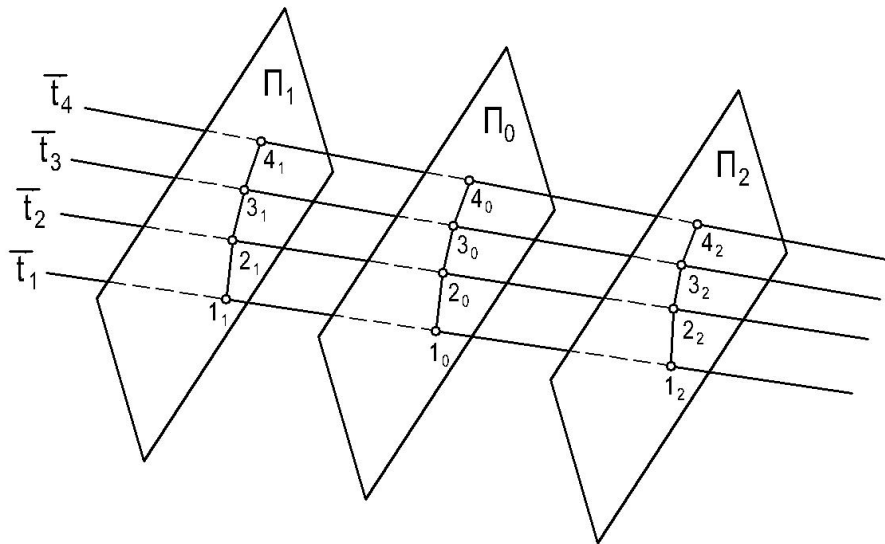


Рис. 3. До паралельного перенесення площини

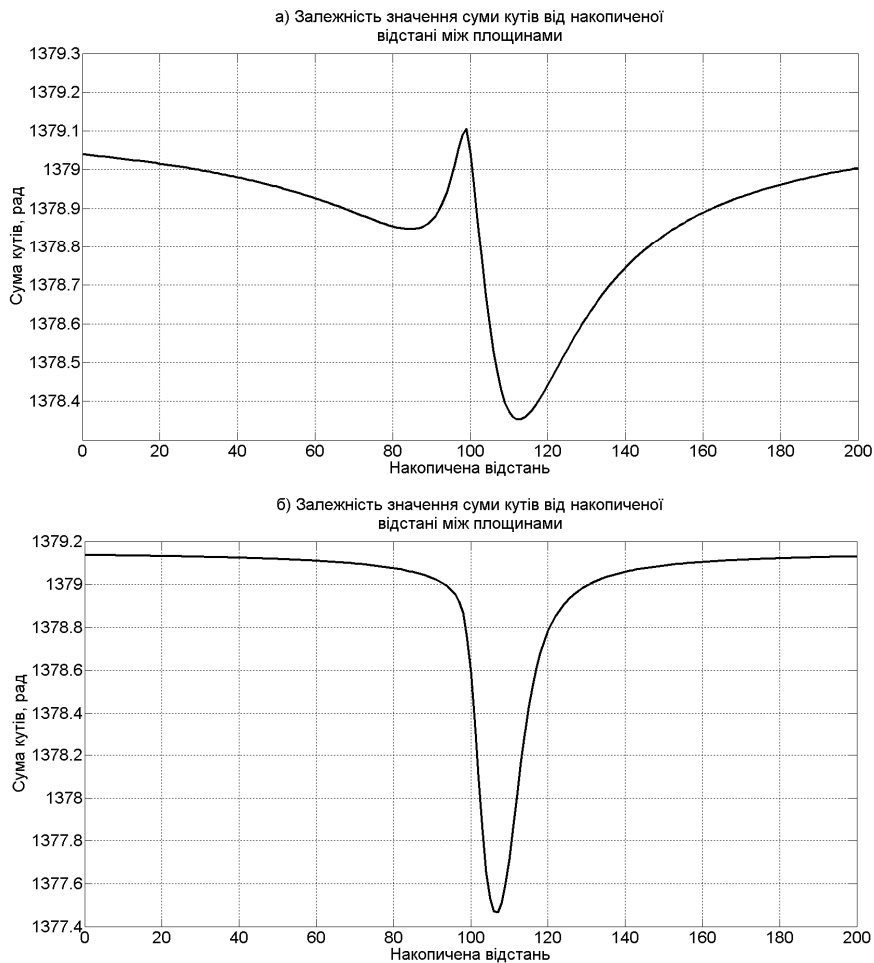


Рис. 4. Графіки залежності значення суми кутів від накопиченої відстані між площинами: а – з трьома локальними екстремумами, б – з одним

3. Визначаємо перше наближення координат осі коноїда. Алгоритм визначення цієї прямої складається з таких дій.

3.1. Визначаємо координати точок, в яких зафіксована площина перетинає твірні. З'єднуємо дві крайні точки прямою. Обчислюємо функцію $f_1(l)$, яка є сумою відстаней цієї прямої від твірних.

$$f_1 = \sum \frac{\left| (x_i - a_1) \cdot \begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ n_{yi} & n_{zi} \end{vmatrix} + (y_i - a_2) \cdot \begin{vmatrix} b_3 & b_1 \\ n_{zi} & n_{xi} \end{vmatrix} + (z_i - a_3) \cdot \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ n_{xi} & n_{yi} \end{vmatrix} \right|}{\sqrt{\begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ n_{yi} & n_{zi} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} b_3 & b_1 \\ n_{zi} & n_{xi} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ n_{xi} & n_{yi} \end{vmatrix}^2}}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

де a_1, a_2, a_3 – координати точки, інцидентної осі коноїда;

b_1, b_2, b_3 – проекції вектора осі коноїда;

x, y, z, n_x, n_y, n_z – координати точки, інцидентної i -ій твірній, та координати проекцій вектора i -ої твірної;

k – кількість твірних.

Крайня точка розділяє свою твірну на дві частини і, відповідно, задає на твірній два напрями. В одному з напрямів з певним кроком переміщаємо цю точку вздовж твірної і обчислюємо функцію f_1 (рис. 5). Крок, з яким переміщається точка, задається залежно від поставлених задач. Цю операцію повторюємо доти, доки зменшується значення функції f_1 . Фіксуємо її мінімальне значення і координати прямої, які їй відповідають. Аналогічні дії виконуємо, переміщаючи точку у протилежному напрямі. З двох зафіксованих значень функції f_1 вибираємо менше. Надалі точку вздовж крайньої твірної будемо переміщати в напрямі, який відповідає цьому меншому значенню.

3.2. Паралельно самій собі переміщаємо зафіксовану площину в одному з напрямків і виконуємо дії, аналогічні діям підпункту 3.1, але крайню точку переміщаємо вздовж своєї твірної лише у вибраному у попередньому підпункті напрямку. Порівнюємо отримане мінімальне значення функції f_1 з мінімальним значенням, отриманим у попередньому підпункті. Якщо воно менше, то надалі площину будемо паралельно переміщати у вибраному в цьому підпункті напрямку. Якщо ж більше, то – у протилежному напрямку.

3.3. Визначаємо перше наближення координат осі коноїда, обчислюючи функцію f_1 . При цьому паралельно переміщаємо з певним кроком зафіксовану площину у напрямку, вибраному у підпункті 3.2, і переміщаємо крайню точку вздовж своєї твірної у напрямку, вибраному у підпункті 3.1. Крок, з яким переміщаються площина і точка відповідно, задаються залежно від змістовної суті поставленої задачі. Цю операцію повторюємо доти, доки зменшується значення функції f_1 . Фіксуємо координати прямої, які відповідають остаточному мініимальному значенню функції f_1 . Призначаємо ці координати першим наближенням осі коноїда.

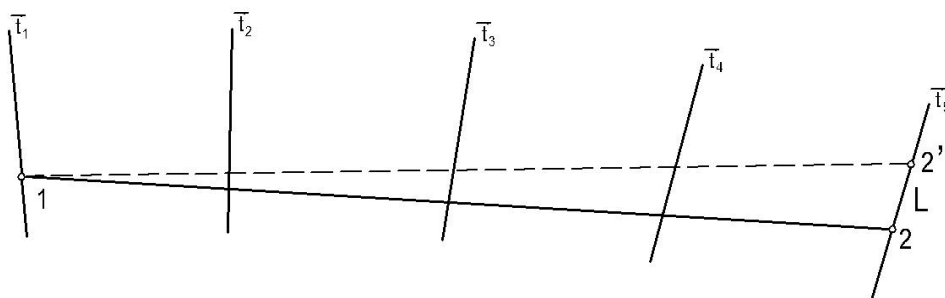


Рис. 5. Переміщення точки вздовж крайньої твірної

4. Визначаємо остаточні координати осі коноїда. Мінімізуємо функцію $f_2(2)$, яка є сумою відстаней осі коноїда від твірних (в якості початкового наближення до осі коноїда, призначаємо координати, отримані в підпункті 3.3)

$$f_2(a, b) = \sum \frac{\left| (x_i - a_{x1}) \cdot \begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ n_{yi} & n_{zi} \end{vmatrix} + (y_i - a_{y1}) \cdot \begin{vmatrix} b_3 & b_1 \\ n_{zi} & n_{xi} \end{vmatrix} + (z_i - a_{z1}) \cdot \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ n_{xi} & n_{yi} \end{vmatrix} \right|}{\sqrt{\begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ n_{yi} & n_{zi} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} b_3 & b_1 \\ n_{zi} & n_{xi} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ n_{xi} & n_{yi} \end{vmatrix}^2}}, \quad i = \overline{1; k}, \quad (2)$$

де x, y, z, n_x, n_y, n_z – координати точки, інцидентної-ї твірній, та координати проєкцій вектора i -ої твірної;

$$a_{x1}(v_1) = a_{x01} + \left(n_{x1} / \sqrt{n_{x1}^2 + n_{y1}^2 + n_{z1}^2} \right) \cdot v_1, \quad a_{y1}(v_1) = a_{y01} + \left(n_{y1} / \sqrt{n_{x1}^2 + n_{y1}^2 + n_{z1}^2} \right) \cdot v_1,$$

$$a_{z1}(v_1) = a_{z01} + \left(n_{z1} / \sqrt{n_{x1}^2 + n_{y1}^2 + n_{z1}^2} \right) \cdot v_1 \text{ – координати першої точки, інцидентної осі коноїда;}$$

$$a_{x2}(v_2) = a_{x02} + \left(n_{xk} / \sqrt{n_{xk}^2 + n_{yk}^2 + n_{zk}^2} \right) \cdot v_2, \quad a_{y2}(v_2) = a_{y02} + \left(n_{yk} / \sqrt{n_{xk}^2 + n_{yk}^2 + n_{zk}^2} \right) \cdot v_2,$$

$$a_{z2}(v_2) = a_{z02} + \left(n_{zk} / \sqrt{n_{xk}^2 + n_{yk}^2 + n_{zk}^2} \right) \cdot v_2 \text{ – координати другої точки, інцидентної осі коноїда;}$$

$a_{x01}, a_{y01}, a_{z01}, a_{x02}, a_{y02}, a_{z02}$ – початкове наближення координат точок, інцидентних осі коноїда;

v_1, v_2 – відстань між початковими і новими координатами точок, інцидентних осі коноїда;

$b_1 = a_{x1} - a_{x2}, b_2 = a_{y1} - a_{y2}, b_3 = a_{z1} - a_{z2}$ – проєкції вектора осі коноїда;

k – кількість твірних.

Точність розробленого алгоритму була перевірена на десяти різних коноїдах. Спершу на площині $z = 0$ задавалась сітка з трикутними комірками. Після цього в точках сітки обчислювалася апліката континуально заданої поверхні, тобто формувалася дискретно представлена поверхня. Після цього в кожній точці відсіка задавалась твірна, тобто формувалася дискретний каркас з 441-ої впорядкованої твірної. Якщо за одиницю довжини прийняти 1 м , то розміри сторін сітки склали $3 \times 3 \text{ м}$, а крок точок дорівнював $0,2 \text{ м}$. Оскільки рівняння поверхонь є відомими, то була можливість порівняти дійсні координати осей коноїда з наближеними.

Для оцінки точності наближеного визначення осі коноїда обчислювалася відстань і кутове відхилення між апроксимуючою та дійсною осями. Також обчислювалася сума відстаней апроксимуючої осі коноїда від твірних цієї поверхні.

Для перевірки роботи алгоритму вибиралися непрямі коноїди, для яких площина паралелізму була перпендикулярна площині $z = 0$. Рівняння коноїдів задавалися таким чином, щоб осі коноїдів проходили під різними кутами до площини паралелізму.

Для коноїда, описаного параметричними рівняннями $x = v - \frac{v^3}{3}$,

$$y = 0,2 \left(v - \frac{v^3}{3} \right) + u \left(v^2 - 0,2 \left(v - \frac{v^3}{3} \right) \right), \quad z = 0,2 \left(v - \frac{v^3}{3} \right) + u \left(\frac{3}{2}v + 1 - 0,2 \left(v - \frac{v^3}{3} \right) \right),$$

сума відстаней від твірних до апроксимуючої осі коноїда дорівнювала $2,9452 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Відстань між апроксимуючою і дійсною осями склали $1,9051 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, а кутове відхилення – $6,2603 \cdot 10^{-7} \text{ рад}$.

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом твірних. Проаналізована точність розробленого алгоритму на прикладі різних коноїдів. Критерії відхилення, для досліджуваних поверхонь, дорівнювали близькому до комп'ютерного нуля числу. Надалі планується розробити алгоритми наближеного визначення визначників інших типів дискретно представлених поверхонь.

1. Кривошапко С.Н. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. – М.: Наука, 2006. – 544 с.

Стаття надійшла 14.04.2015.

УДК 629.3.018.2

О.М. Марціяш¹, І.С. Мурований², В.І. Павлюк²¹Технічний коледж Тернопільського національного технічного університету Імені Івана Пулюя,²Луцький національний технічний університет**ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕЯКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ
АВТОМОБІЛЬНИХ АМОРТИЗАТОРІВ**

Розроблено стенд для визначення деяких робочих характеристик амортизаторів підвіски легкового автомобіля з метою покращення навчального процесу під час проведення лабораторних досліджень. Отримано характеристики зусиль опору для гідравлічного та газо-гідравлічного амортизаторів у режимі їх роботи зі закритими клапанами. Проведено порівняльний аналіз зміни силових характеристик за період становлення параметрів роботи амортизаторів.

Ключові слова: стенд, підвіска, амортизатор, зусилля, характеристика.

Рис. 4. Літ. 11.

О.М. Марціяш, И.С. Мурованый, В.И. Павлюк**ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ**

Разработан стенд для определения некоторых рабочих характеристик амортизаторов подвески легкового автомобиля с целью улучшения учебного процесса при проведении лабораторных исследований. Получены характеристики усилий сопротивления для гидравлического и газо-гидравлического амортизаторов в режиме их работы с закрытыми клапанами. Проведен сравнительный анализ изменения силовых характеристик за период становления параметров работы амортизаторов.

Ключевые слова: стенд, подвеска, амортизатор, усилия, характеристика.

O.Martsiyash, I.Murovanyi, V.Pavlyuk**THE LABORATORY STAND TO DETERMINE CERTAIN CHARACTERISTICS OF THE
WORK AUTOMOTIVE SHOCK ABSORBERS**

The stand is designed to determine some of the characteristics of shock absorbers suspension of the car. Expensive stands for the diagnosis of shock absorbers for student learning is not have always available. The stand has a simple design.

The device composed of dynamometer, lever mechanism and electromechanical drive. Developed by stand that improves the process of student learning. The stand is used by students for laboratory studies. Shock absorbers working at the stand with the closed valves. Changing the working fluid viscosity depends on the temperature. Characteristics force moving of the rod depends on the viscosity of the working fluid. The performance characteristics obtained for hydraulic and gas-hydraulic shock absorbers car. The analysis of the characteristics of effort during the time the formation of the operating parameters held. In the future stand needs to be improved for the diagnosis of shock absorbers in other modes.

Keywords: stand, suspension, shock absorber, effort, characteristics.

Постановка проблеми. Безперечним є вплив стану елементів підвіски автомобіля на безпеку його руху. Характеристики амортизаторів впливають на ряд важливих експлуатаційних властивостей транспортного засобу: плавність ходу, стійкість, керованість, гальмівні властивості та інші.

У конструкції підвіски автомобіля широкого застосування набули гідравлічні телескопічні амортизатори. Для забезпечення безпеки та комфорту руху характеристики амортизаторів узгоджуються з характеристиками пружних елементів підвіски та можуть бути предметом комплексного вибору власником транспортного засобу.

У процесі експлуатації автомобіля характеристики роботи амортизаторів змінюються внаслідок механічного спрацювання, втрати справності елементів гідравлічної системи, зміни властивостей робочої рідини. Тому виникає потреба у контролюванні роботи амортизаторів та періодичному діагностуванні їх стану. Перевірка параметрів та характеристик підвіски у цілому, чи її елементів зокрема, потребує використання спеціального обладнання. Визначення стану амортизаторів може здійснюватися як безпосередньо на автомобілі за допомогою відповідних установок, так і окремого амортизатора на випробувальних стендах.

Аналіз досліджень і публікацій. У нормативних документах вказані основні вимоги щодо технічних вимог та випробування автомобільних амортизаторів [1, 2, 3].

У статті [4] розглянуто перелік джерел патентної інформації, галузевих стандартів, що стосуються діагностування підвіски легкових автомобілів і зокрема амортизаторів.

За допомогою спеціальних стендів знімаються характеристики роботи амортизаторів, проводиться перевірка їх герметичності, шумності, плавності ходу та стабільності показників [5, 6, 7].

Вартість стенду залежить від складності його конструкції, яка в свою чергу визначається різноманітністю режимів випробувань, кількістю і точністю контрольованих параметрів та можливістю перевірки амортизаторів найбільш широкою номенклатури. Значна вартість стендів [8] для проведення комплексних досліджень, стримують їх використання для вивчення окремих параметрів, властивостей і характеристик амортизаторів у навчальному процесі. Для дослідження студентами роботи автомобільних амортизаторів, актуальним є розроблення недорогого спеціального обладнання [9].

Характерною ознакою роботи рідинного амортизатора підвіски автомобіля є зміна його силової характеристики зі зміною в'язкості робочої рідини від температури. Іноді для стабільності параметрів зусилля опору амортизатора у конструкції його механізмів можуть передбачатися заходи температурної компенсації [10].

Зацікавлення викликає процес становлення параметрів роботи амортизатора та особливості його протікання залежно від конструкційного виконання та технічного стану вузла.

Ціль статті (постановка завдання). Метою роботи є розроблення стенду для дослідження окремих робочих параметрів амортизатора підвіски легкового автомобіля, для можливості використання розробки в умовах навчального процесу.

Для цього, на основі аналізу конструкцій та параметрів існуючих стендів і установок, потрібно підібрати обладнання та виготовити лабораторний стенд. Отримати характеристики процесу становлення силових показників роботи амортизаторів різного конструкційного виконання.

Матеріали і результати дослідження. Для виконання поставлених завдань, на основі технічних вимог, що ставляться для проведення таких досліджень, розроблено та виготовлено лабораторний стенд (рис. 1).



Рис. 1. Стенд для визначення деяких робочих характеристик амортизаторів підвіски легкового автомобіля:

1 – динамометричний механізм; 2 – коромисло; 3 – стояки; 4 – платформа основи; 5 – шатун; 6 – привод; 7 – елементи кріплення і регулювання довжини шатуна; 8 – елементи кріплення і регулювання положення динамометричного механізму; 9 – елементи кріплення і регулювання положення коромислового механізму; 10 – досліджуваний амортизатор; 11 – скоба динамометричного механізму; 12 – повзун; 13 – пружина; 14 – стрілка динамометра; 15 – шкала.

Основні елементи пристрою: динамометричний механізм, шарнірно-важільний механізм, електромеханічний привод розміщені на платформі основи виробу. Динамометричний механізм 1 закріплений на одному з плечей коромисла 2. Вісь коромисла закріплена на двох стояках 3

платформи основи 4. Коромисло приводиться в рух через шатун 5 електромеханічним приводом 6. Конструкційні заходи 7, 8, 9, спрямовані для надання можливості регулювання кінематичних параметрів стану, залежно від параметрів досліджуваного амортизатора 10.

Конструкція динамометричного механізму вибрана за умови спрощення вузла. У напрямних скоби 11 динамометричного механізму 1 рухається повзун 12, до нижньої частини якого кріпиться шток амортизатора 10. У початковому (нульовому) положенні повзун 12 знаходиться під дією зворотних пружин 13 і його осьове зміщення в процесі роботи визначається за показами стрілки покажчика 14 на шкалі 15.

Умовами проведення випробувань передбачено можливість проведення досліджень зі сталою частотою коливань поршня амортизатора [3]. Таким чином передатне число електромеханічного приводу кривошипа є сталим (рис. 2).

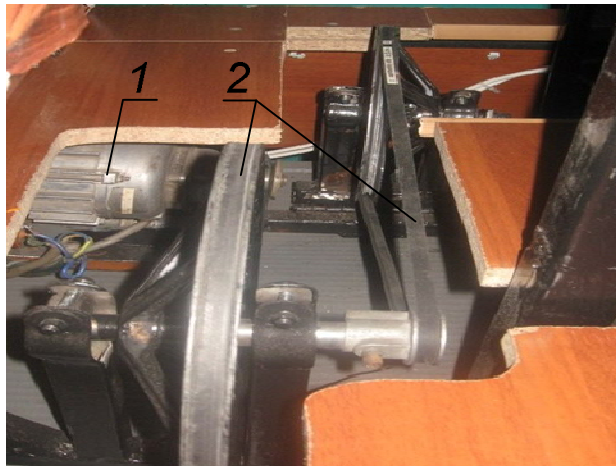


Рис. 2. Електромеханічний привод стану:

1 – мотор-редуктор; 2 – пасова передача приводу кривошипа.

За вимогами стандартів на проведення випробувань в режимі повільного переміщення штока «робота амортизаторів з закритими клапанами» для ходу стиску і віддачі [2, 3] шарнірно-важільний механізм стану забезпечує зворотно-поступальний рух штока досліджуваного амортизатора зі швидкістю близько 0,08 м/с.

Вибір потрібних кінематичних параметрів важільного механізму стану відповідно до технічних даних досліджуваного амортизатора досягається системою налаштувань та регулювання (рис. 3).



Рис. 3. Елементи кріплення та регулювання положення осі коромисла і довжини шатуна:

1, 6 – коромисло; 2 – стояки; 3 – вісь коромисла; 4 – елементи кріплення кронштейна осі коромисла; 5 – отвори кріплення осі коромисла у стояках; 7 – фіксатор кронштейна верхнього шарніра шатуна; 8 – напрямна кронштейна; 9 – кронштейн верхнього шарніра шатуна; 10 – досліджуваний амортизатор; 11 – скоба динамометричного механізму; 12 – повзун; 13 – пружина; 14 – стрілка динамометра; 15 – шкала.

Розроблений стенд імітує роботу амортизатора підвіски легкового автомобіля в режимі повільних ходів. Пристрій дає можливість отримати характеристику $P=f(t)$, що відображає зміну зусилля переміщення штока амортизатора P за час t перехідного процесу становлення робочого параметра у режимах ходів стиску і віддачі.

Для прикладу, побудовані графіки (рис. 4) за результатами проведених досліджень амортизаторів задньої підвіски автомобіля ВАЗ-2107 [11], що мають відмінності у конструкції і різний технічний стан (гідравлічні – № 1, 2 та газо-гідравлічний – № 3).

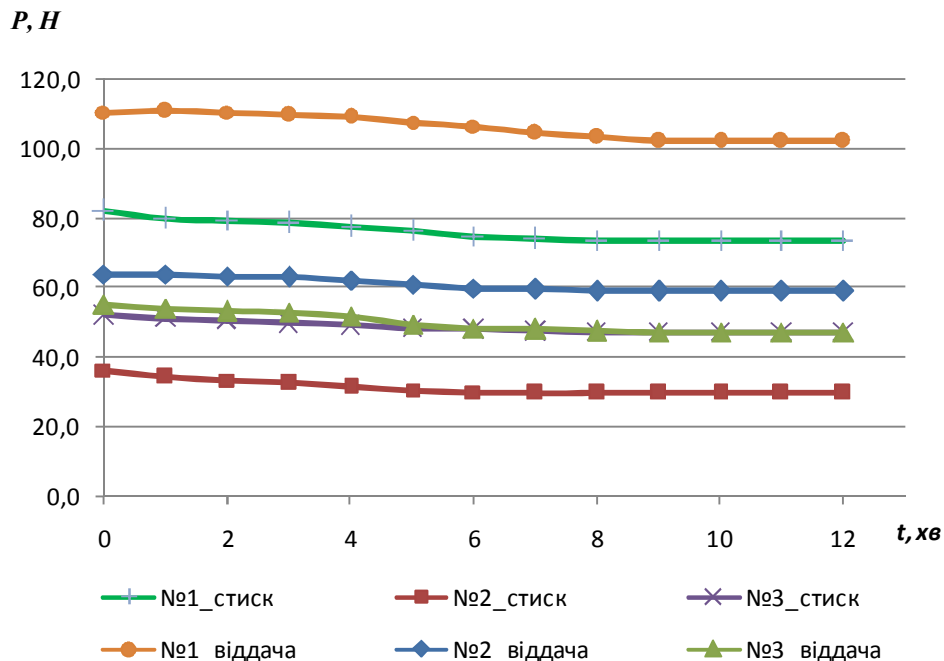


Рис. 4. Зусилля опору переміщення штока амортизаторів задньої підвіски автомобіля ВАЗ-2107 у режимі роботи «з закритими клапанами»: № 1, 2 – телескопічні гідравлічні амортизатори; № 3 – газо-гідравлічний амортизатор.

Відхилення визначених показників зусиль опору гідравлічного амортизатора №1 у порівнянні з аналогічними характеристиками гідравлічного амортизатора №2 становлять більше 55% для ходу стиску та близько 43 % для ходу віддачі.

Перевищення допустимих відхилень сил опору амортизаторів від їх середніх значень відповідно – $\pm 50\%$ для стиску і $\pm 30\%$ для віддачі [3], можуть бути свідченням про технічну несправність амортизатора.

Для досліджуваного газо-гідравлічного амортизатора характеристики зусиль для обох ходів майже збігаються.

Зменшення зусиль переміщення штока амортизатора у режимі ходів стиску і віддачі становить 10–20% за час перехідного процесу становлення робочих параметрів, що для усіх амортизаторів за даних умов проведення досліджень становить 8–10 хв.

Висновки. Запропонована розробка дозволяє зняти характеристику, що відображає зміну зусиль опору амортизаторів різної конструкції за час становлення показників роботи досліджуваного вузла. За отриманими величинами зусиль, що розвивають амортизатори різних конструкцій під час випробувань, можна провести їх порівняльний аналіз та сформулювати висновок про їх загальний технічний стан.

Розроблений стенд використовується у навчальному процесі під час проведення лабораторних досліджень для вивчення конструкції і характеристик автомобільних амортизаторів та для проведення науково-дослідної роботи студентів.

У подальшому, є потреба дообладнати механізм приводу пристрою системою керування частотою коливань при переміщенні штока амортизатора.

1. СТ СЭВ 3044–81 Амортизаторы телескопические гидравлические автомобильные. Методы стендовых испытаний. Министерство автомобильной промышленности. – М.: 1984. – 6с. Срок введения 01.07.1984.
2. ОСТ 37.001.084–84 Амортизаторы гидравлические телескопические автомобильные. Методы стендовых испытаний. Министерство автомобильной промышленности. – М.: 1985. – 7с. Срок введения 01.01.1985.
3. ГОСТ Р 53816-2010 Автомобильные транспортные средства. Амортизаторы гидравлические телескопические. Технические требования и методы испытаний. Стандартинформ. – М.: 2010. – 21с. Дата введения 15.09.2010.
4. Павленко В.М. Стан розвитку методів діагностування підвіски автомобіля [Електронний ресурс] / В.М.Павленко // ISSN N 2078-6840. Вісник Національного технічного університету «ХП». – Х. : НТУ «ХП». – 2012. – № 64 (970). – С.63-69. Режим доступу:
http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Автомобіле-тракторобудування2012/64/pavlenko.pdf
5. Беляев В.М. Автомобили: Испытания / В.М. Беляев, М.С. Высоцкий и др. Под ред. А.И. Гришкевича: учеб. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 187 с.: ил.
6. Балабин И.В.. Испытания автомобилей / И.В. Балабин, Б.А. Куров. С.А. – М.: Машиностроение, 1978.–199 с.: ил.
7. Испытание автомобилей / Цимбалин В.Б. и др. – М.: Машиностроение, 1988.–192 с.: ил.
8. Испытательные стенды для проверки амортизаторов: [Електронний ресурс] // «ООО Авто Технологии». 2015. URL: <http://autote.ru/index.php/prod/test-benches>.
9. Марціянш О.М., Іванюра І.Т., Булік Ю.В., Іванюра Н.І. Лабораторний стенд для визначення деяких робочих параметрів системи мащення автомобільного двигуна. // Наукові нотатки. Вип. 46. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. С. 366 – 370.
10. Ночніченко І.В. Підвищення термостабільності гідравлічного амортизатора: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. – Київ, 2013. – 20 с.
11. ВАЗ-2107, -21047 с двигателями 1,5; 1,5i; 1,6; 1,6i. Устройство, обслуживание, диагностика, ремонт. Иллюстрированное руководство. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2011. – 256 с.: ил.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2015.

УДК 621.891

С.В. Мисковець, П.П. Савчук*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***ФІЗИКО-ХІМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ТЕРТІ ПАРИ СТАЛЬ-БРОНЗА***Проведено визначення впливу властивостей матеріалу при односторонньому терті на зносостійкість бронзи BrO10C10 при взаємодії з різними сталевими контрзразками в середовищі дизельних палив.**Ключові слова: зносостійкість, дизельні палива, пари тертя, бронза.***С.В. Мисковец, П.П. Савчук****ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ ПАРЫ СТАЛЬ-БРОНЗА***Проведено исследование влияния свойств материала при одностороннем трении на износостойкость бронзы BrO10C10 при взаимодействии с различными стальными контртелами в среде дизельных топлив.**Ключевые слова: износостойкость, дизельные топлива, пары трения, бронза.***S. Myskovets, P. Savchuk****PHYSICOCHEMICAL INTERACTION OF MATERIALS IN FRICTION COUPLE STEEL-BRONZE***The influence of material properties with one-sided friction on the wear resistance of bronze BrO10S10 in interaction with various steel counterface among diesel fuels.**Keywords: durability, diesel fuel, friction pairs, bronze.*

Постановка проблеми. Процеси тертя і зношування за своїм характером є комплексними, із складною структурою фізико-хімічної взаємодії, що призводить до постановки завдань виняткової математичної складності, мало придатних для інженерної практики, що підвищує роль і актуальність експериментальних досліджень для виявлення і опису причинно-імовірнісних зв'язків і залежності між властивостями матеріалів і їх зносостійкістю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Засадничу роль при виявленні закономірностей між властивостями матеріалів і довговічністю вузла тертя грають роботи І.В. Крагельського [1], Б.І. Костецького [2], присвячені розкриттю фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні тертя. Велика увага впливу хімічного складу конструкційних матеріалів і їх властивостей на знос при терті в середовищі низькомолекулярних вуглеводневих рідин приділена в роботах О.Ф. Аксьонова [3] і інших

Постановка задачі. Визначити вплив властивостей матеріалу при односторонньому терті на зносостійкість бронзи BrO10C10 у спряженні з різними сталевими контрзразками – ШХ15, 12ХН3А, 95Х18, Х12М.

Матеріали і результати досліджень. Випробування проводилися при лінійному контактуванні поверхонь на машині тертя ПТЛК(ор) згідно вибраної методики випробувань[4]. В якості змащувального середовища було використано дизельне паливо.

Результати випробувань приведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати зношування бронзи BrO10C10 різних серій поставок у поєднанні з різними контртілами

Марка сплаву ГОСТ 613-79	№ зразка	ШХ15	12ХН3А	95Х18	Х12М
BrO10C10	1	10,80	5,75	11,5	6,10
	2	8,55	3,17	7,02	8,16
	3	14,22	4,55	5,86	7,83
	4	13,07	4,18	6,60	5,96
	5	16,22	2,40	4,68	8,32

Як видно з таблиці, найкращу зносостійкість бронза БрО10С10 має при контактуванні зі сталлю 12ХН3А, найгіршу – зі сталлю ШХ15. Звідси також видно, що матеріал контртіла чинить домінуючий вплив на зносостійкість БрО10С10: так для пари тертя БрО10С10 – ШХ15 максимальну зносостійкість має зразок №2, мінімальну – зразок №5; для пари БрО10С10 – 12ХН3А відповідно зразок №5 і зразок №1; для пари БрО10С10 – 95Х18 найкраща зносостійкість у зразка №5, найгірша – у зразка №1. У процентному відношенні відмінність у ряді зносостійкості при терті БрО10С10 з різними контртілами складає: Бр010С10 – ШХ15 – 90 %; Бр010С10 – 12ХН3А – 150 %; Бр010С10 – 95Х18 – 138 %; Бр010С10 – Х12М – 40 %.

На підставі отриманих даних можна стверджувати, що зносостійкість матеріалів залежить від спряження матеріалів пари тертя. Очевидно, що хімічна активність сплаву при терті з різними контртілами буде різною. Підтвердженням нашого припущення служать дані оже-спектральних досліджень, які проводилися на оже-спектрометрі Jamp-10S. Перед проведенням досліджень зразки очищалися в ультразвуковому диспергаторі. Як миючі рідини використовувалися спирт етиловий (ГОСТ 5962-67) і ацетон (ТУ 6-09-35В-82). Час очищення 15 хвилин в кожному розчиннику. Дослідження ділянок тертя поверхонь зразків проводилися при прискорюючій напрузі 10 кВ, діаметрі електронного зонда від 25 нм до 50 мкм, струмі електронного променя $5 \cdot 10^{-7}$ А, напрузі модуляції 5 еВ у вакуумі не нижче, ніж $2 \cdot 10^{-7}$ Па. Пошарове травлення вибраної ділянки з метою вивчення розподілу елементів від поверхні углиб зразка здійснювалося іонами аргону скануючою іонною гарматою при прискорюючій напрузі 3 кВ, струмі 30 мА і діаметрі іонного зонду 50 мкм. Розмір розпиленої зони задавався в режимі скануючого іонного пучка в межах від 50,0 x 50,0 мкм до 450,0 x 450,0 мкм.

Оже-спектральні дослідження доріжок тертя в парах БрО10С10 з ШХ15 і Х12М показали (рис. 1 – 4), що при роботі пари БрО10С10 із сталлю Х12М концентрація кисню досягає 10 %, а глибина його дифузії знаходиться в межах 125...200 нм. При терті пари БрО10С10 з ШХ15 концентрація кисню досягає 5 %, а глибина дифузії знаходиться в межах 50...80 нм.

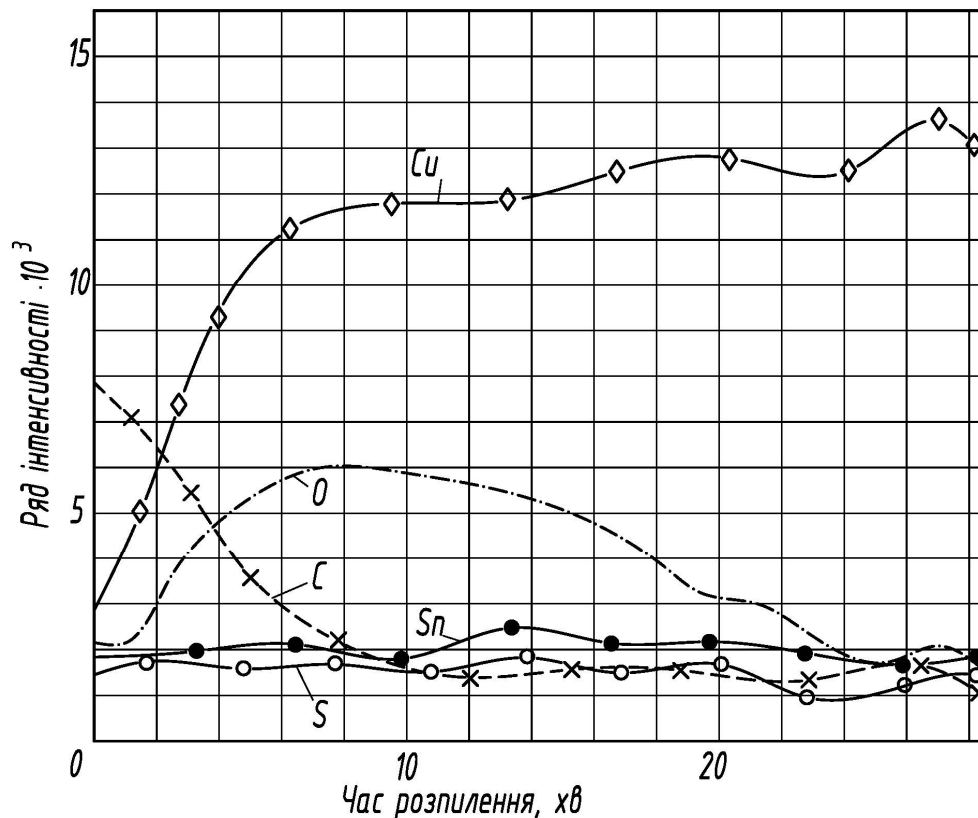


Рисунок 1 – Залежності розподілу елементів по глибині від поверхні тертя зразків БрО10С10 при контакті з Х12М

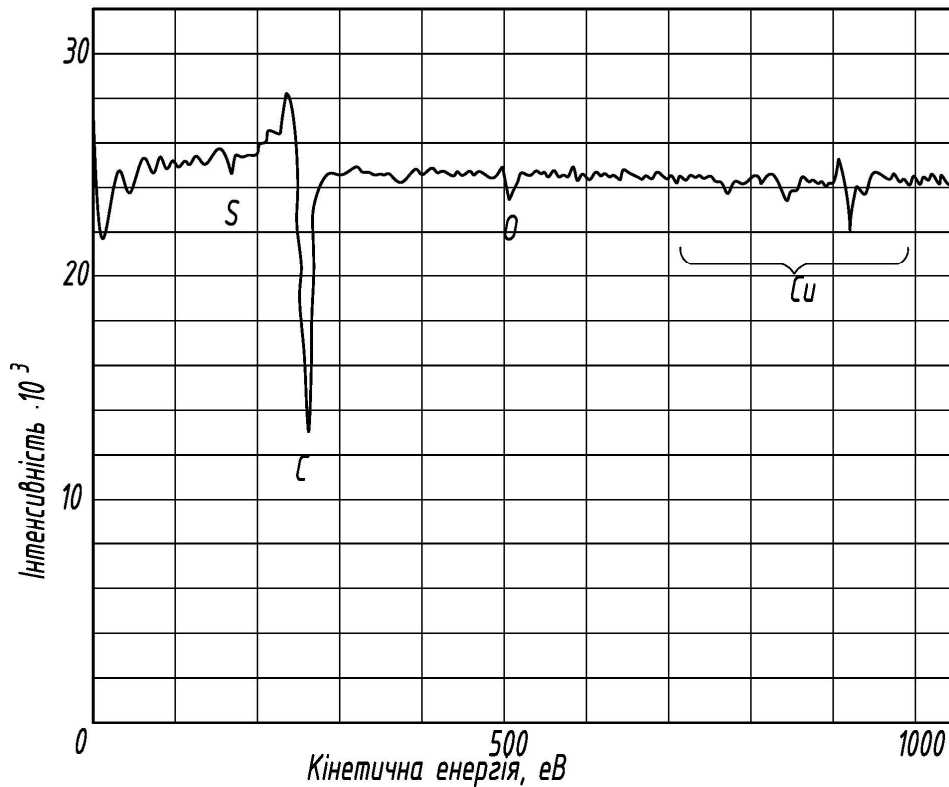


Рис. 2. Оже-пектроскопія поверхні БрО10С10 при терті з Х12М

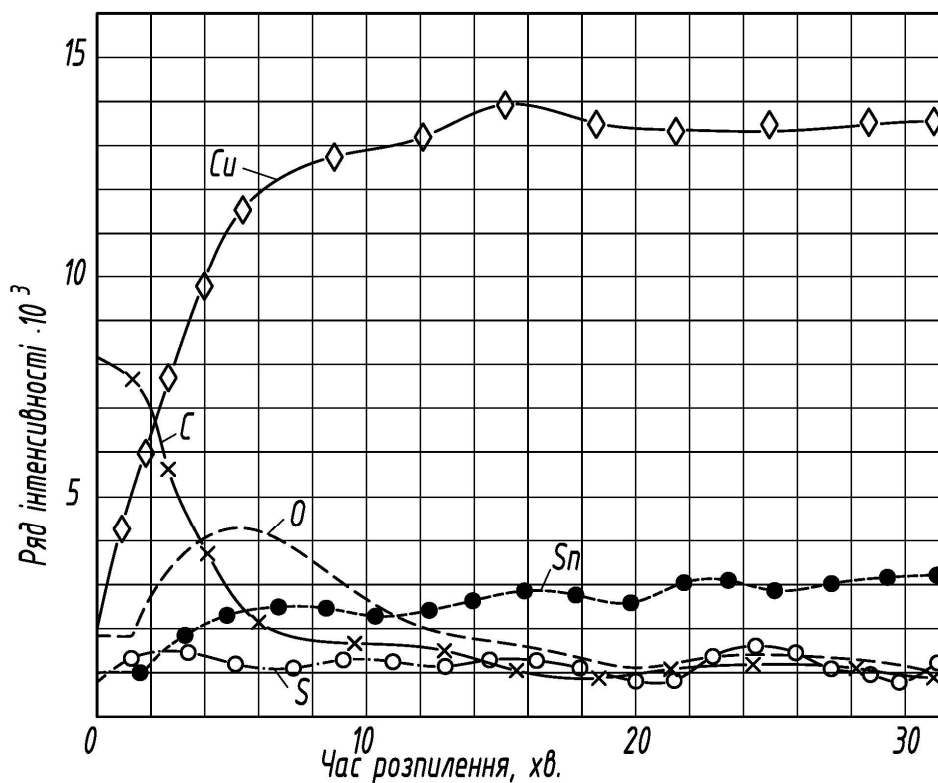


Рис. 3. Залежності розподілу елементів по глибині від поверхні тертя зразків БрО10С10 при контакті з ШХ15

Отже, як було показано і в інших роботах [2, 3], основну роль при терті відіграє концентрація кисню в трибоконтакті. Із збільшенням кисню знос зменшується, що пояснюється утворенням структур I і II роду по Б.І. Костецькому [2], а, отже, і інтенсивність зношування теж зменшується. В середовищі кисню, як відзначається в роботі [5], на поверхні контакту спостерігається екзоелектронна емісія.

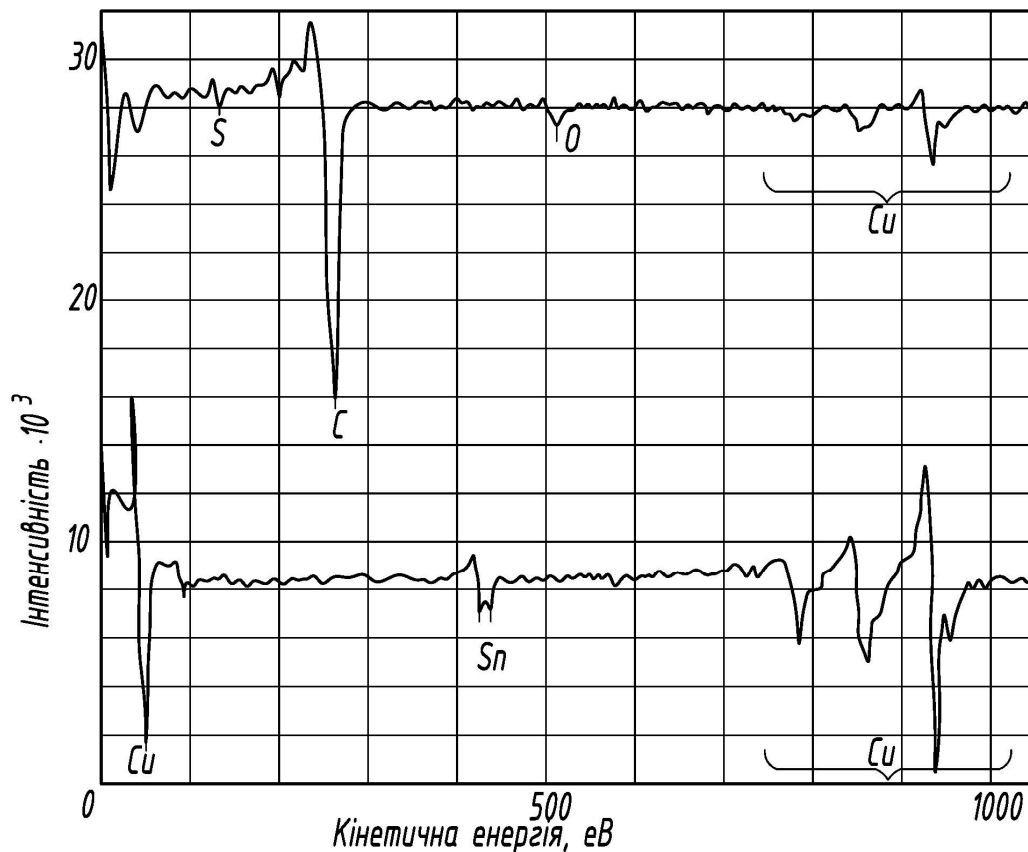


Рис. 4. Оже-спектроскопія поверхні BrO10C10 при терті з ШХ15

Із зростанням концентрації кисню інтенсивність екзоелектронної емісії збільшується, а після деякого часу, коли поверхня покривається шаром кисню, екзоелектронна емісія припиняється. Різкий підйом інтенсивності екзоелектронної емісії пояснюється адсорбцією кисню на поверхні металу. В процесі утворення плівки на поверхні звільняється енергія, яка за допомогою емісії екзоелектронів йде в навколишнє середовище. Потім адсорбований на поверхні кисень вступає в реакцію утворюючи окисли і при цьому спостерігається новий прояв екзоелектронної емісії. Надалі уся поверхня покривається оксидом і інтенсивність екзоемісії зменшується, що свідчить про завершення процесу утворення на поверхні металу захисної плівки, енергія руйнування якої перевищує роботу сил тертя в контакті, тому, як наслідок, зменшується інтенсивність зношування.

Разом з тим спостерігається різний розподіл олова, як в поверхневому шарі, так і по глибині. Це ще раз вказує на відмінність в протіканні фізико-хімічних процесів, а, отже, і інтенсивності зношування залежно від хімічного складу матеріалу, його фізичних і механічних властивостей.

Дослідженнями С.В. Кадомського [6] показано, що для кожного мідного сплаву існує своя оптимальна об'ємна концентрація кисню, яка визначається хімічною активністю сплаву, а збільшення інтенсивності зношування при вищому рівні активації поверхневого шару визначається більшою глибиною окислення диспергуючих часток.

Фізико-хімічна взаємодія матеріалів в процесі тертя призводить до дифузійного перерозподілу елементів в зоні контакту деталей пари тертя. Одним з чинників, що визначають хімічну активність сплаву, якраз є кількість легуючих елементів, їх дифузійний перерозподіл в поверхневих шарах контактуючих металів.

Оскільки сплави мають різний хімічний склад, то і кількість легуючих елементів у них різна, і в процесі дифузійного перерозподілу основних легуючих елементів в поверхневих шарах при терті BrO10C10 з різними контртілами братимуть участь свої, властиві цій парі тертя легуючі елементи.

Як було показано вище при терті BrO10C10 в парі зі сталлю ШХ15 в середовищі дизельних палив вирішальний вплив на зносостійкість чинить нестабільність складу Pb. При терті BrO10C10 з іншими контртілами (12ХН3А, 95Х18, Х12М), очевидно, відбуваються аналогічні процеси, але на її зносостійкість домінуючий вплив чинитиме інший легуючий елемент або група елементів, властива цій парі тертя.

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що матеріал контртіла чинить істотний вплив на зносостійкість зразків різних серій поставок БрО10С10, а різниця в зносостійкості між різними спряженнями матеріалів знаходиться в межах від 40 до 150%.

Враховуючи взаємний вплив легуючих елементів на зносостійкість конструкційних матеріалів і відсутністю теоретичних основ взаємозв'язку між хімічним складом і зносостійкістю для збільшення працездатності вузлів тертя залишається єдиний шлях вирішення цієї проблеми – здійснення вхідного контролю конструкційних матеріалів по їх зносостійкості з урахуванням геометрії контакту, кінематики руху, поєднання матеріалів і середовища.

1. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Костецкий Б.И. Фундаментальные закономерности трения и износа. – Киев: Знание, 1981. – 30 с.
3. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных гидкостях. – М.: Машиностроение, 1977. – 152с.
4. Шимчук С.П. Прилад тертя для дослідження конструкційних і мастильних матеріалів при односторонньому і реверсивному терті / С.П. Шимчук // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Випуск 41, частина 2. – Луцьк, 2013. – С. 262–268.
5. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 360с.
6. Кадомский С.В. Оценка и выбор износостойких медных сплавов для топливорегулирующей аппаратуры с учетом конструкции узлов трения. – Дисс. канд. техн. наук. – Киев, 1984. – 202 с.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2015.

UDC 544.77

I.A. Moroz

Lutsk National Technical University

**SPECIFICS OF THE FORMATION OF THE SPATIAL STRUCTURE OF THE SUSPENSIONS
PRECIPITATES**

Specifics of the formation of the spatial structure of the precipitates of basic carbonates of copper and nickel and of manganese and cobalt carbonates from their suspensions in dispersive media of various chemical nature – bidistilled water, 1,4-dioxane, isopropanol and isobutanol – are discussed. The role of the powder re-dispersion processes in the preparation of the suspensions and of the aggregation processes during sedimentation in the formation of the spatial structure of the precipitates was shown.

The spatial structure formed of the powders of the investigated carbonates is non-uniform and has sections with various particle packing density. The mean particle consistence depends on the primary particle packing density within only partially destructed aggregates (nuclei) which form during the re-dispersion of powders in liquids and on the secondary packing density of these surviving aggregates (nuclei). Coordination numbers for the primary and the secondary particle packing density in the spatial structure of the precipitates were determined from the mean particle density.

Keywords: topological structure, particle packing density, basic copper carbonate, basic nickel carbonate, manganese carbonate, cobalt carbonate

I.A. Мороз

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ СУСПЕНЗІЙНИХ
ОСАДІВ**

Обговорюються особливості формування просторової структури осадів основних карбонатів міді та нікелю і карбонатів марганцю та кобальту з їх суспензій в дисперсних середовищах різної хімічної природи – бідистильованій воді, 1,4-діоксані, ізопропіловому та ізобутиловому спиртах. Показано роль повторного редиспергування порошків і процесів агрегації у формуванні просторової структури осадів.

Просторова структура, сформована з порошків досліджуваних карбонатів, неоднорідна і має ділянки з різною щільністю упаковки частинок. Середній розмір часток залежить від первинної щільності упаковки частинок в частково зруйнованих агрегатах (ядрах), які утворюються у процесі повторного диспергування порошків в рідинах і вторинною щільністю укладки цих ядер під час формування осадів (ядер). Координаційні числа для первинної та вторинної щільності упаковки частинок в просторовій структурі осадів були визначені із середньої щільності частинок.

Ключові слова: топологічна структура, щільність упаковки частинок, основний карбонат міді, основний карбонат нікелю, карбонат марганцю, карбонат кобальту

И.А. Мороз

**ОСОБЕНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
СУСПЕНЗИОННЫХ ОСАДКОВ**

Обсуждаются особенности формирования пространственной структуры осадков основных карбонатов меди и никеля и карбонатов марганца и кобальта с их суспензий в дисперсных средах различной химической природы – бидистиллированной воде, 1,4-диоксане, изопропиловом и изобутиловом спиртах. Показана роль повторного редиспергування порошков и процессов агрегации в формировании пространственной структуры осадков.

Пространственная структура, сформированная из порошков исследуемых карбонатов, неоднородна и имеет участки с различной плотностью упаковки частиц. Средний размер частиц зависит от первоначальной плотности упаковки частиц в частично разрушенных агрегатах (ядрах), которые образуются в процессе повторного диспергирования порошков в жидкостях и вторичной плотностью укладки этих ядер при формировании осадков (ядер). Координационные числа для первичной и вторичной плотности упаковки частиц в пространственной структуре осадков были определены из средней плотности частиц.

Ключевые слова: топологическая структура, плотность упаковки частиц, основной карбонат меди, основной карбонат никеля, карбонат марганца, карбонат кобальта

1. Introduction

The challenges of combining contradictory properties in new materials require the transition to multi-component and multi-phase physico-chemical systems. These systems put forward extraordinarily strict demands to the uniformity and compactness of the starting topological ceramic mixture that is characterized by a certain degree of interrelation of various phases and components. The metal carbonates, along with metal oxides and hydroxides, are frequently used for the synthesis of functional ceramics [1-5]. One of the important stages of the preparation of ceramics is the formation of a uniform starting topological mixture from fine particles of differing chemical nature. This spatial structure of the ceramic mixture substantially affects during the following stages the parameters of finished articles, particularly the reproducibility of the properties. The task of the formation of a uniform topological

structure of the starting ceramic batch is especially complicated when fine powders with particle size under 10 μm are used, since such disperse powders are in aggregated state in air [6]. Spontaneous aggregation of fine powders limits the possibility of achieving high uniformity of the ceramic batch and necessary quality of finished articles. The spatial structure of the powders in ceramic mixtures is also affected by their polydispersity. The dependence of the pore dimensions on the size of the particles of which the spatial structure is formed was discussed in [7]. However, future investigation of the topological structure of powders, the accumulation of new experimental results for the powders of various chemical nature and the substantiation of theoretical generalizations remain the current challenge for the modern ceramic technology.

2. Description of materials, dispersive media and experimental techniques

The following materials were used in the investigations:

- basic copper carbonate powder, $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ (Fluka), density $4.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
 - basic nickel carbonate powder, $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$ (Fluka), density $3.55 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
 - manganese carbonate powder, MnCO_3 (Fluka), density $3.125 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
 - cobalt carbonate powder, CoCO_3 (Sigma-Aldrich), density $4.13 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.
- All powders were of purum p.a. grade, were insoluble in water or organic solvents.

The following liquids were used as dispersive media:

- bidistilled water with specific conductivity $0.06 \mu\text{Sm/cm}$;
- 1,4-dioxane, $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ (Merck), the principal component content 99.9 %;
- isopropanol, $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ (Merck), the principal component content 99,5 %;
- isobutanol, $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{OH}$ (Merck), the principal component content 99,4 %.

Sedimentation volumes were determined to define the topological structure of the precipitates, from which the mean particle consistence φ_0 was calculated used formula

$$\varphi_0 = \frac{m}{V_c \cdot \rho}, \quad (1)$$

where m is the powder mass, ρ is the density of the powder substance, V_c is the sedimentation volume of the powder precipitate from the suspensions with different dispersive media.

The mean particle radius of the powder in the investigated suspension is determined by the sedimentation analysis using a technique described in [8].

3. Results and Discussion

Spatial coagulation and non-coagulation structures of the disperse systems are distinguished. A non-coagulation structure forms under the influence of gravitational forces by the non-interacting particles (or those where the attraction forces are very weak compared to the gravitational forces). A statistical chaotic particle packing is achieved under these conditions, such as appears in gravity pouring of the powders, with mean particle consistence 0.61 ± 0.02 [9,10]. A coagulation structure is defined as a structure formed by the interacting particles that is fixed in the site of the original contact. Thereafter, the formed aggregates do not destruct under the influence of external forces (gravitational forces, Brownian motion, mechanical mixing). The possibility of the formation of a spatial coagulation structure due to the adhesion and the incidence of contacts between the particles as a result of far-reaching surface forces is defined by the condition [11]

$$\sum_{i=1}^K F_i \geq m_0 \cdot g, \quad (2)$$

where K is the number of contacts with the adjacent particles (coordination number), F_i is the adhesion force of the i -th contact, m_0 is the relative mass of the particles, g is the Earth gravity.

For the identical spherical particles of radius r and the identical adhesion force in each contact F , the condition (2) can be given as an inequality

$$K \cdot F \geq m_0 \cdot g. \quad (3)$$

One can theoretically determine from the condition (3) a coordination number that makes possible the formation of a spatial coagulation structure

$$K \geq \frac{m_0 \cdot g}{F}. \quad (4)$$

The inequality (4) leads to a conclusion that the coordination number in a spatial coagulation structure shows how many times the gravitational forces exceed the far-reaching surface forces (particle adhesion forces).

The mean coordination number in spatial coagulation structure formed of identical spherical particles for statistical chaotic packing varies widely between 2 and 10 [12]. The mean coordination number for polydisperse particles can be even higher.

The relative mass of the spherical particles of radius r is determined by the formula

$$m_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0)}{3} \quad (5)$$

where ρ is the density of the powder substance, ρ_0 is the density of the dispersive medium.

The adhesion force of the singular contact of two identical spherical particles is determined from the dependence of their interaction energy on the distance between them [13]

$$F = \frac{dV_A}{dH} = \frac{r \cdot A}{12 \cdot H^2}, \quad (6)$$

where V_A is the interaction energy of particles at the distance H between them, A is the Hamaker constant.

Brownian motion does not destroy the spatial coagulation structure if the attraction energy of the particles exceeds the Brownian motion energy, i.e. if $V_A \geq 1$ kT. From this condition one can determine the boundary distance H_0 at which the particles would settle in the formation of a spatial coagulation structure

$$H_0 = \frac{r \cdot A}{12k \cdot T} \quad (7)$$

Substituting (7) into (6) and then (5) and (6) into (4), we determine a theoretical value of a coordination number K that makes possible the formation of a spatial coagulation structure

$$K \geq \frac{\pi(\rho - \rho_0)^2 \cdot r^4 \cdot A}{9(kT)^2} \quad (8)$$

Assuming the average value of the Hamaker constant for carbonates in air as $A_{SAS} = 25$ kT [14] and $\rho \gg \rho_0$, we determine a coordination number for a possible formation of a spatial coagulation structure of the particles of investigated powders in air

$$K \geq 21.4\rho \cdot r^4, \quad (9)$$

where ρ is the density of the powder substance in g/cm^3 , r is the particle radius in μm .

Liquid dispersive media have lower relative particle mass and the Hamaker constant compared to air. For the investigated powders and dispersive media the relative mass (and consequently, the gravitational forces) decrease 1.2-1.5 times, the Hamaker constant decreases 4.5-5 time, and cumulative average decrease is 6.4 times. Thus the coordination number for the possible formation of a spatial coagulation structure in liquid dispersive media also decreases to

$$K \geq 3.3 \cdot \rho \cdot r^4. \quad (10)$$

The particle radii found by the sedimentation analysis of the suspensions with the solids content of 5 g/dm^3 in various dispersive media are given in Table 1. The results of the electron microscopy determination of the particle dimensions are also presented.

Table 1. The particle radius of metal carbonates in the dispersive media of varying chemical nature

Powder	Particle radius (μm) in liquid dispersive media				Electron microscopy particle radius (μm)
	water	1,4-dioxane	isopropanol	isobutanol	
$(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$	5.6	6.3	6.2	5.1	2.6
MnCO_3	4.2	4.4	3.6	3.1	1.6
$(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$	0.7	1.3	0.5	0.4	0.2
CoCO_3	0.4	1.2	0.4	0.2	0.1

The particle radii determined by electron microscopy are significantly lower than the particle radii in any dispersive medium. This indicates that the radii found by the sedimentation analysis

characterize the dimensions of the aggregates of the primary particles. The radii of the particle aggregates for the powder of the same compound depend on the nature of the dispersive medium. The dimensions of these aggregates depend of re-dispersion degree and on the development of the aggregation processes in the investigated dispersive medium. The smallest particle dimensions were observed for the suspensions in isobutanol, the largest were for the suspensions in 1,4-dioxane as the dispersive medium.

The coordination numbers that theoretically allow the formation of a spatial coagulation structure are given in Table 2.

Obtained results show that only the particles of $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$ and CoCO_3 can form a spatial coagulation structure, since the adhesion force of a singular contact between particles significantly exceed the gravitational forces ($K \ll 1$) both in air and in liquid dispersive media thus providing for the mutual particle fixation in the point of the first contact. The gravitational forces significantly exceed the adhesion force of a singular contact for the particles of $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ and MnCO_3 ($K \gg 1$). In cases where the adhesion force is not sufficient for the particle fixation in the point of the first contact, the gravity of the particles lead to the appearance of spatial non-coagulation structures (gravity structures).

Table 2. Theoretically calculated coordination numbers that make possible the formation of a spatial coagulation structure for the particles of metal carbonates in air and in liquid dispersive media

Powder	Theoretically calculated coordination numbers in liquid dispersive media:	
	air	liquid dispersive media: water, 1,4-dioxane, isopropanol, isobutanol
$(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$	3912	604
MnCO_3	438	67
$(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$	0.12	0.018
CoCO_3	0.009	0.001

The coordination number K and the particle packing density (volume filling of the precipitates) φ are connected by the correlation [12]

$$K = Q \cdot \varphi, \quad (11)$$

where Q is a coefficient that varies from 12.6 for a non-periodic (disordered) spatial structure to 16.2 for the densest periodic (ordered) spatial structure.

The particle packing density in the sediments in air and in the investigated dispersive media is presented in Table 3.

Table 3. The particle packing density of the powders of metal carbonates in air and in the investigated dispersive media of various chemical nature

Powder	Particle packing density in various dispersive media				
	air	water	1,4-dioxane	isopropanol	isobutanol
$(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$	0.50	0.47	0.40	0.42	0.46
MnCO_3	0.40	0.38	0.36	0.42	0.42
$(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$	0.23	0.18	0.12	0.23	0.23
CoCO_3	0.19	0.094	0.082	0.094	0.098

For the constant dispersive medium, the decrease of the primary particle size (determined by electron microscopy) causes the decrease of the particle packing density. This agrees well with the fact that the ratio of gravitational forces to the adhesion force of a singular contact between particles decreases sharply (proportionally to r^4) with the decrease of the primary particle size. Such a decrease is illustrated by the changes of theoretically calculated coordination number (Table 3) that confirm the appearance of the conditions favourable to the formation of a coagulation structure. A similar dependence was also discovered in [9].

The far-reaching surface forces between the particles assist the aggregate formation, therefore the re-dispersion of the particles in various dispersive media does not occur fully but to certain steady aggregates the dimension of which are given in Table 2. The particle aggregation degree is better described not by the particle aggregate radius but by the number of the primary particles in them. The number of the primary particles in the aggregates n can be calculated by the formula

$$n = 0.617 \left(\frac{r_a}{r} \right)^3, \tag{12}$$

where r_a – particle aggregate radius, r – primary particle radius, 0.617 – a coefficient of the primary particle packing density in the aggregates.

Assuming that periodic spatial structures form in the investigated systems, we can estimate a mean coordination number K_0 for the periodic particle packing from the experimentally determined particle packing density φ_0 (Table 3) and Equation (11) using formula

$$K_0 = 16.2\varphi_0. \tag{13}$$

Obtained results are presented in Table 4.

Table 4. Coordination numbers for a periodic K_0 and disordered K_1 and K_2 spatial structures formed of the particles of metal carbonates in air and in dispersive media of various chemical nature

Powder	Coordination numbers K_0, K_1 and K_2 in various dispersive media														
	air			water			1,4-dioxane			isopropanol			isobutanol		
	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2
$(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$	8.1	10	10.3	7.68	10	9.6	6.5	10	8.2	6.8	10	8.6	7.5	10	9.4
MnCO_3	6.5	10	8.2	6.1	10	7.8	5.8	10	7.3	6.8	10	8.6	6.8	10	8.6
$(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$	3.7	10	4.7	2.9	10	3.7	1.9	10	2.5	3.7	10	4.7	3.7	10	4.7
CoCO_3	3.2	10 (6)	3.8 (6.6)	1.5	10 (6)	2.9 (3.2)	1.3	10 (6)	1.7 (2.8)	1.5	10 (6)	1.9 (3.2)	1.6	10 (6)	2.0 (3.3)

One can see that the mean coordination number K_0 for $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ and MnCO_3 in any media is less than 10, while for $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$ and CoCO_3 particles, on occasion, the number is even less than 2. The coordination numbers below 2 are unrealistic because a spatial structure could not form were it real. The coordination number values below 10 do not correspond to the closest-packed periodic structure for which the calculations were performed. Therefore it is concluded that obtained spatial structures cannot be described by periodic formations because, clearly, sections with different (larger or smaller) particle packing density co-exist in the structures.

During the preparation of suspensions and powder re-dispersion in liquids the destruction of the particle aggregates that exist in air occurs gradually. First, the peripheral particles pull away from the aggregate as they are linked the weakest, and eventually the densest nucleus remains that retains the original structure of the particle packing. Then during the suspension sedimentation, these nuclei form the secondary structure of the particle packing. Therefore, under such conditions of the precipitate formation the mean particle packing density is determined by formula

$$\varphi_0 = \varphi_1 \cdot \varphi_2, \tag{14}$$

where φ_0 is the mean particle packing density, φ_1 is the primary particle packing density of the partially destructed aggregates (nuclei) with coordination number K_1 , φ_2 is the secondary packing density of nuclei particles with coordination number K_2 .

It is reasonable to assume that the partially destructed aggregates (nuclei) have the highest particle packing density of statistical-chaotic packing, i.e. $\varphi_1 = 0.617$ and $K_1 = 10$. Within this assumption, one can estimate the coordination number K_2 for the secondary particle packing density from Eqs. (11) and (13) and the mean particle packing density φ_0 (Table 3) using formula

$$K_2 = 12.6\varphi_2 = 12.6\varphi_0 / \varphi_1 = 20.4\varphi_0 \tag{15}$$

Obtained results are presented in Table 4. The coordination numbers for the primary and the secondary particle packing density are nearly identical for the $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ particles which indicates high uniformity of the spatial structure. In these suspensions the coagulation processes do not substantially affect the formation of the spatial structure because the gravitational forces exceed the particle adhesion forces by a factor of 604 (Table 2). For the MnCO_3 particles, the coordination numbers for the secondary packing are somewhat lower than those for the primary packing but not significantly so. Therefore we assert sufficient uniformity of this spatial structure as well. The gravitational forces exceed the MnCO_3

particle adhesion forces by a factor of 67, thus the influence of the coagulation processes is minor. For the $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$ particles, the coordination numbers for the secondary packing are significantly lower than those for the primary packing. This indicates the non-uniformity of the spatial coagulation structure. The least uniform is the spatial coagulation structure of the CoCO_3 particles because the coordination number for the secondary packing is very small; occasionally the calculated values are less than 2 which is unrealistic. Therefore it is necessary to assume for this powder that the particle packing density in the nuclei does not correspond to the highest coordination number 10, but is somewhat lower, e.g. with coordination number $K_1 = 6$. The coordination numbers for the secondary packing K_2 in this case are given in Table 4 in parentheses. These are more acceptable but still show significant non-uniformity of the spatial coagulation structure. In the CoCO_3 particles, the effect of the far-reaching surface forces on the formation of the coagulation structure is the greatest of the investigated powders, as the gravitational forces are 1000 times weaker than the adhesion forces.

Conclusions

The following conclusion are arrived at from the obtained results and the analysis of the spatial structure of investigated powders:

- the spatial structure formed by the powder particles of the studied carbonates is non-uniform and is characterized by sections with different (larger or smaller) particle packing density;
- the mean particle packing density in the spatial structure is defined by the primary particle packing density in the partially destructed aggregates (nuclei) that form during the re-dispersion of the powders in liquids and by the secondary packing density of these nuclei during the sedimentation process;
- the increase of the particle dispersion degree (decrease of their dimensions) favors the formation of less dense and more non-uniform spatial structures;
- among the studied dispersive media (water, 1,4-dioxane, isopropanol, isobutanol), the aggregation processes are the most intense for 1,4-dioxane; consequently, the spatial coagulation structures are the least dense.

1. Bansal N.P. Handbook of Ceramic Composites / Bansal N.P. – Berlin/New York: Springer-Verlag, 2005. – 398 p.
2. Adomson A. W. Physical chemistry of surfaces / Adomson A. W. – New York- London-Sydney-Toronto : Wiley – Interscience, 1997. – 808 p
3. Fayed M.E., Otten L. Handbook of Powder Science and Technology/ M.E. Fayed, L. Otten – London: Chapman & Hall, 1997. – 580 p.
4. Керамические материалы / [Масленникова Г. Н., Мамеладзе Р. А., Мидзута С., Коумото К.]. – М. : Стройиздат, 1991. – 313 с.
5. Поляков А. А. Технология керамических радиоэлектронных материалов. / Поляков А. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 200 с.
6. Redispersion of TiO_2 particles in aqueous solutions / Z.M.Yaremko, N.H.Tkachenko, C.Bellmann, A.Pich // J. Colloid and Interface Sci. – Vol. 296. – № 2. – P. 565-571.
7. Ronault Y. Probabilistic approach towards modeling the relationships between particle and pore size distributions: the multicomponent packed sphere case / Y. Ronault, S. A. Assouline // Powder Technology – 1999. – Vol. 96, № 1. – P. 33–41.
8. Крючков Ю. Н. Параметры пористой структуры проницаемых материалов. 2. Моно- и полидисперсные материалы / Ю. Н. Крючков // Коллоидн. журн. – 1998. – Т. 60. – С. 357-360.
9. Дульнев Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
10. Агрегативная устойчивость суспензий и плотность их коагуляционной структуры/З.М. Яремко, В.Д. Гаврылив, А.Я. Ястремский, М.Н. Солтыс // Коллоидн. журн. – 1994. – Т. 56. - № 1. – С. 129-132.
11. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы/ Урьев Н. Б. – М. : Химия, 1980. – 255 с.
12. Яремко З.М. Залежність координаційного числа дисперсних систем від об'ємного наповнення // Укр. хім. журн. – 1999. – Т. 65. – № 3. – С. 32–38.
13. B.V. Derjaguin, N.V. Churaev and V.M. Muller, Surface Forces, Consultants Bureau, New York, 1987.
14. Russel W. B. Colloidal Dispersions / Russel W. B., Saville D.A., Showalter W.R. – London : Cambridge Univ. Press, 1989. – 148 p.

Стаття надійшла до редакції 26.08.2014.

УДК 514.182.7

О. В. Мостовенко*Київський національний університет будівництва і архітектури***СУПЕРПОЗИЦІЇ ДИСКРЕТНО ПОДАНИХ ПОВЕРХОНЬ (ДПП) НА СІТЦІ З ПРЯМОКУТНИМИ АБО КВАДРАТНИМИ У ПЛАНІ КЛІТИНАМИ**

У публікації розглянуто можливість керування формою врівноважених оболонок, які є дискретними аналогами неперервних криволінійних поверхонь, з урахуванням об'єму, що перекривається за рахунок використання апарату суперпозицій. Виведено формулу для підрахунку числа вихідних образів (сіток). Цей спосіб керування формою поверхні при заданому об'ємі дозволяє на стадії ескізного архітектурного проектування обирати найкращу форму з двопараметричної множини форм за енергоефективними, естетичними та іншими ознаками.

Ключові слова: суперпозиція, врівноважене покриття, поверхня, дискретний каркас, управління формою, об'єм.

А.В. Мостовенко**СУПЕРПОЗИЦИИ ДИСКРЕТНО ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (ДПП) НА СЕТКЕ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИЛИ КВАДРАТНЫМИ В ПЛАНЕ ЯЧЕЙКАМИ**

В публикации рассмотрена возможность управления формой уравновешенных оболочек, которые являются дискретными аналогами непрерывных криволинейных поверхностей, с учетом перекрываемого объема, за счет использования аппарата суперпозиций. Выведена формула для подсчета числа исходных образов (сеток). Этот способ управления формой поверхности при заданном объеме позволяет на стадии эскизного архитектурного проектирования выбирать наилучшую форму из двухпараметрического множества форм по энергоэффективному, эстетическому и другим признакам.

Ключевые слова: суперпозиция, уравновешенное покрытие, поверхность, дискретный каркас, управление формой, объем.

A. Mostovenko**SUPERPOSITION OF DISCRETE CAST SURFACES (DCS) ON THE GRID WITH RECTANGULAR OR SQUARE IN TERMS OF CELLS**

This publication deals with the ability to control the form of balanced membranes that are discrete analogues of continuous curved surfaces, given the volume by overlapping of using superposition. We derive a formula for counting the number of output images (nets). This method of control shape of a given volume allows for preliminary architectural design stage to choose the best form of twoparametric plural forms for energy efficient, aesthetic and other features.

Keywords: superposition, balanced coverage, surface, discrete frame, form management, volume.

Постановка проблеми. Однією з важливих задач при проектуванні просторових архітектурних покриттів є енергозбереження, особливо, враховуючи наше прагнення до стрімкої євроінтеграції. В процесі архітектурного проектування задачі енергозбереження можна пов'язати з об'ємом приміщення, який, в свою чергу, пов'язано з витратами на опалення, вентиляцію та кондиціонування підоболонкового простору. При цьому виникає проблема управління формою поверхні покриття при заданому об'ємі, що перекривається. Ця проблема ускладнюється, якщо покриття є безмоментним і поверхня не може бути описана аналітичним рівнянням. Такі поверхні формуються в дискретному вигляді статико-геометричним методом [1].

Аналіз останніх досліджень. В роботі [2] для управління формою розтягнутих врівноважених сіток, що моделюють поверхні тентових покриттів, використано метод суперпозицій або складання функцій. Автором цієї роботи запропоновано спосіб управління формою врівноважених розтягнутих сіток з однаковою топологією.

Сітка із заданими параметрами управління формою утворюється при функціональному додаванні координат вузлів врівноважених вихідних сіток з певними ваговими коефіцієнтами $k_{i,j}$:

$$X_{i,j} = k_{1x} \cdot X'_{i,j} + k_{2x} \cdot X''_{i,j} + k_{3x} \cdot X'''_{i,j} + \dots + k_{nx} \cdot X^n_{i,j}; \quad (1)$$

$$Y_{i,j} = k_{1y} \cdot Y'_{i,j} + k_{2y} \cdot Y''_{i,j} + k_{3y} \cdot Y'''_{i,j} + \dots + k_{ny} \cdot Y^n_{i,j}; \quad (2)$$

$$Z_{i,j} = k_{1z} \cdot Z'_{i,j} + k_{2z} \cdot Z''_{i,j} + k_{3z} \cdot Z'''_{i,j} + \dots + k_{nz} \cdot Z^n_{i,j}, \quad (3)$$

де $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$ – координати нової сітки;

$k_{1x}, k_{2x}, \dots, k_{nx}, k_{1y}, k_{2y}, \dots, k_{ny}, k_{1z}, k_{2z}, \dots, k_{nz}$ – коефіцієнти суперпозиції.

Якщо задано координати вузлів всіх вихідних сіток і коефіцієнти суперпозиції за формулами (1-3) можна підрахувати всі координати нової сітки, яка також буде врівноважена зусиллями:

$$P_{i,j} = k_{1z} \cdot P'_{i,j} + k_{2z} \cdot P''_{i,j} + k_{3z} \cdot P'''_{i,j} + \dots + k_{nz} \cdot P^n_{i,j}. \quad (4)$$

Дійсно формули (1-3) можна розглядати, як суму афінних перетворень вихідних сіток і тому нова сітка буде також врівноваженою під дією вертикальних зусиль (4).

Дослідження в роботі [2] не пов'язані з формуванням врівноважених сіток, що перекривають задані об'єми.

Основна частина. Метод суперпозицій дозволяє використовувати необмежене (з теоретичної точки зору) число параметрів управління формою ДПП. Ця властивість надає додаткові можливості для управління формою опорного контура сітки. Основною умовою використання методу суперпозицій є однакова топологія вихідних образів (сіток).

Оскільки дане дослідження пов'язане з підрахунком об'ємів, що перекриваються дискретно визначеними поверхнями на правильній у плані сітці, абсциси і ординати вузлів сітки не потребують складних перетворень. Тому рівняння (1), (2) в подальшому розглядати не будемо. Рівняння (3) дозволяє керувати формою ДПП на заданій у плані правильній сітці. Число n коефіцієнтів $k_{1z}, k_{2z}, \dots, k_{nz}$ відповідає числу вихідних поверхонь. Конструктивними параметрами ДПП є аплікати окремих вузлів, які можуть бути заданими.

Для того, щоб число рівнянь відповідало числу невідомих, коефіцієнти $k_{1z}, k_{2z}, \dots, k_{nz}$ повинні бути невідомими.

Якщо відповідні задані вузли вихідних і результуючої поверхонь мають однакові аплікати, то для таких вузлів рівняння суперпозиції набуває вигляду:

$$k_{1z} + k_{2z} + \dots + k_{nz} = 1. \quad (5)$$

Якщо вихідні і результуюча ДПП мають l таких вузлів, при m заданих, то число вихідних поверхонь суперпозиції підраховуються за формулою:

$$n = m - l + 1. \quad (6)$$

Для пояснення формули (6) наведемо тривіальний приклад для однієї клітини сітки:

Приклад 1.

Задано аплікати кутових вузлів чотирьох вихідних образів (рис. 1):

$$\begin{aligned} Z_A^I &= Z_A^{II} = Z_A^{III} = Z_A^{IV}; & Z_B^I, Z_B^{II}, Z_B^{III}, Z_B^{IV}; \\ Z_C^I &= Z_C^{II} = Z_C^{III} = Z_C^{IV}; & Z_D^I, Z_D^{II}, Z_D^{III}, Z_D^{IV} \end{aligned} \quad (7)$$

Задано також аплікати кутових вузлів результуючого образу:

$$Z_A, Z_B, Z_C, Z_D (Z_A = Z'_A; Z_C = Z'_C) \quad (8)$$

Необхідно знайти коефіцієнти суперпозиції вихідних образів для отримання заданого результату.

Число вихідних образів (чотири) відповідає числу заданих аплікат результуючого образу. Аналітичний вираз суперпозиції має вигляд:

$$\begin{aligned}
 Z_A &= k_1 Z_A^I + k_2 Z_A^{II} + k_3 Z_A^{III} + k_4 Z_A^{IV}; \\
 Z_B &= k_1 Z_B^I + k_2 Z_B^{II} + k_3 Z_B^{III} + k_4 Z_B^{IV}; \\
 Z_C &= k_1 Z_C^I + k_2 Z_C^{II} + k_3 Z_C^{III} + k_4 Z_C^{IV}; \\
 Z_D &= k_1 Z_D^I + k_2 Z_D^{II} + k_3 Z_D^{III} + k_4 Z_D^{IV},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

де число невідомих коефіцієнтів відповідає числу рівнянь, але відповідно до умов (7) та (8) перше і третє рівняння системи (9) стають однаковими:

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1. \tag{10}$$

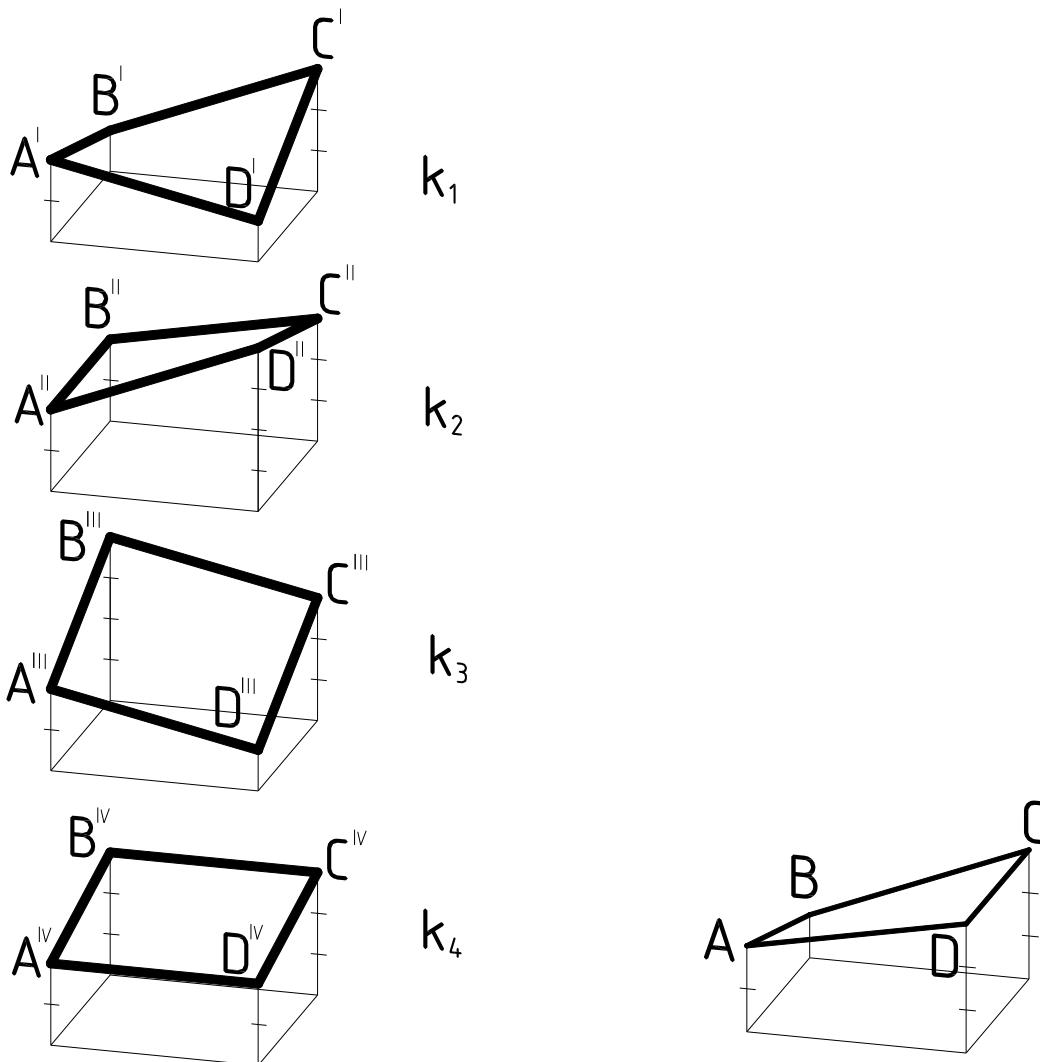


Рис. 1. Суперпозиція чотирьох елементарних призм.

Тому невідомих коефіцієнтів стає на одиницю більше, ніж число рівнянь і один з вихідних образів стає зайвим, як і один з коефіцієнтів.

При виключенні зайвого рівняння (10) яке повторюється двічі і вважаючи коефіцієнт $k_4 = 0$, система (9) набуває вигляду:

$$\begin{aligned}
 k_1 + k_2 + k_3 &= 1; \\
 Z_B &= k_1 Z_B^I + k_2 Z_B^{II} + k_3 Z_B^{III}; \\
 Z_D &= k_1 Z_D^I + k_2 Z_D^{II} + k_3 Z_D^{III}.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Тепер число невідомих коефіцієнтів повністю відповідає формулі (6).

Розв'язання системи (11) дає результат:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{(Z_B''' - Z_B'')(Z_D'' - Z_D''') - (Z_B'' - Z_B''')(Z_D''' - Z_D'')}{(Z_B'' - Z_B''')(Z_D' - Z_D''') - (Z_B' - Z_B''')(Z_D'' - Z_D''')}, \\
 k_2 &= \frac{(Z_B''' - Z_B')(Z_D' - Z_D''') - (Z_B' - Z_B''')(Z_D''' - Z_D')}{(Z_B' - Z_B''')(Z_D'' - Z_D''') - (Z_B'' - Z_B''')(Z_D' - Z_D''')}, \\
 k_3 &= \frac{(Z_B'' - Z_B')(Z_D' - Z_D'') - (Z_B' - Z_B'')(Z_D'' - Z_D')}{(Z_B'' - Z_B')(Z_D'' - Z_D') - (Z_B' - Z_B'')(Z_D''' - Z_D')}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Оскільки суперпозиція (3) є сумою афінних перетворень, то об'єми, що перекриваються ДПП, повністю відповідають властивостям афінних перетворень.

$$V = k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n. \tag{13}$$

Одне з рівнянь системи (11) можна замінити рівнянням (13), тоді замість заданої аплікати одного з вузлів (наприклад Z_D) заданим буде об'єм V :

$$\begin{aligned}
 k_1 + k_2 + k_3 &= 1; \\
 Z_B &= k_1 Z_B^I + k_2 Z_B^{II} + k_3 Z_B^{III}; \\
 V &= k_1 V^I + k_2 V^{II} + k_3 V^{III}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Висновки і перспективи. Апарат суперпозицій як і апарат афінних перетворень дозволяє керувати формою врівноваженої поверхні при заданому об'ємі, що перекривається і обирати архітектору чи проектувальнику на стадії ескізного проектування потрібну йому форму з двопараметричної множини форм.

Планується найближчим часом дослідити використання апарату суперпозицій та афінних перетворень для управління формою врівноважених поверхонь з урахуванням об'єму, що перекривається, з правильними триангуляційними клітинами в плані.

1. Ковалёв С.Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций: дисс. докт. техн. наук: 05.01.01/ Ковалёв Сергей Николаевич - М., 1986. – 320 с.
2. Хай Ч.Х. Управление формой растянутых систем на основе функционального сложения: дисс. канд. техн. наук: 05.01.01/ Хай Чанг Хонг – К., 1994. – 148 с.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2015.

УДК 514.752.4

М.М. Муквич*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Ніжинський агротехнічний інститут»***КОНСТРУЮВАННЯ МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ
ІЗОТРОПНОЇ КРИВОЇ, ЯКА ЛЕЖИТЬ НА КОНУСІ**

У статті здійснено конструювання мінімальних поверхонь із використанням ізотропної кривої, яка лежить на поверхні конуса. Використано аналітичну умову того, що координатні лінії конуса утворюють ізотермічну систему.

Ключові слова: ізотропна крива, мінімальна поверхня, лінійний елемент поверхні.

Форм. 14. Рис. 2. Літ. 8

Н.Н. Муквич**КОНСТРУИРОВАНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ
ИЗОТРОПНОЙ КРИВОЙ, КОТОРАЯ НАХОДИТСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНУСА**

В данной работе осуществлено конструирование минимальных поверхностей с использованием изотропной кривой, которая находится на поверхности конуса. Использовано аналитическое условие того, что координатные линии конуса образуют изотермическую систему.

Ключевые слова: изотропная кривая, минимальная поверхность, линейный элемент поверхности.

M.M. Mukvich**CONSTRUCTION OF MINIMAL SURFACES USING ISOTROPIC CURVE THAT LIES
ON THE CONE**

In the article the design of minimal surfaces using isotropic curve that lies on the surface of the cone. Used analytical condition that the coordinate lines form a cone isothermal system.

Key words: isotropic curve, the minimum surface, line element surface.

Постановка проблеми. Вивчення конструктивних способів побудови та аналітичного опису мінімальних поверхонь зумовлене їх застосуванням при проектуванні сучасних архітектурних конструкцій. Розширення геометричних способів конструювання мінімальних поверхонь пов'язане також із розв'язуванням варіаційної задачі: знайти поверхню найменшої площі, яка б проходила через заданий контур. Указана варіаційна задача має широке застосування при проектуванні поверхонь технічних форм.

Теорія мінімальних поверхонь налічує багато способів конструювання. Ряд учених досліджували мінімальні поверхні засобами варіаційного та тензорного числення. Основною проблемою цих досліджень були труднощі, пов'язані із знаходженням рівнянь мінімальних поверхонь у явному вигляді. Тому для спрощення аналітичного опису мінімальних поверхонь доцільно використовувати ізотропні просторові криві нульової довжини.

У дисертаційних дослідженнях [4, 6] знайдено способи конструювання просторових ізотропних кривих за формулами Шварца та Вейерштрасса [7]. Зокрема, у статті [5] розроблено метод отримання ізотропних кривих за заданою плоскою кривою – їх горизонтальною проекцією. На основі рівнянь ізотропних кривих побудовано мінімальні та приєднані до них поверхні, при цьому геодезичною лінією мінімальної поверхні є задана плоска крива. У статті [1] для побудови ізотропних кривих Без'є застосовуються ізотропні прямі, які визначають сторони характеристичних многокутників. Робота [2] направлена на дослідження побудови мінімальних поверхонь за допомогою ізотропних кривих Без'є. Стаття [3] висвітлює метод побудови сім'ї необмежених мінімальних поверхонь методом Вейерштрасса на базі ізотропної кривої Без'є третього порядку. Слід зазначити, що аналітичний запис ізотропної кривої тільки в окремих випадках дозволяє виконати всі необхідні перетворення для знаходження рівнянь мінімальних поверхонь в явному вигляді. Зокрема, операція інтегрування і відокремлення дійсної та уявної частин функції комплексної змінної найчастіше приводить до запису результатів у неявному вигляді. Тому при конструюванні мінімальних поверхонь важливим є розширення способів утворення ізотропних кривих.

Мета статті. Знайти параметричні рівняння ізотропної кривої, яка лежить на поверхні конуса, використавши аналітичну умову того, що координатні лінії конуса утворюють ізотермічну

систему. На основі вказаної ізотропної кривої побудувати мінімальну поверхню та приєднати до неї.

Виклад основного матеріалу. Знаходження рівнянь мінімальних поверхонь в явному вигляді залежить від аналітичного запису ізотропної кривої, тому для подальшого узагальнення результатів необхідно дослідити окремі випадки утворення просторової кривої нульової довжини.

Як відомо, меридіани і паралелі на поверхні обертання утворюють ізотермічну систему [7], яка конформно відображається на прямокутну сітку координатних ліній на площині. Координатні лінії поверхні, які утворюють ізотермічну систему, відображаються у вигляді нескінченно малих квадратів. Розглянемо поверхню обертання – конус, який задано параметричними рівняннями:

$$\begin{aligned} X(t; v) &= e^{t \cos \beta} \cdot \cos v; \\ Y(t; v) &= e^{t \cos \beta} \cdot \sin v; \\ Z(t; v) &= e^{t \cos \beta} \cdot \operatorname{tg} \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

де $t \in \mathbb{R}$, $v \in [0; 2\pi)$, $\beta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right)$ – параметр конуса.

Знайдемо коефіцієнти першої квадратичної форми конуса за формулами [7]:

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{\partial X}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)^2; \\ F &= \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial X}{\partial v} + \frac{\partial Y}{\partial t} \frac{\partial Y}{\partial v} + \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{\partial Z}{\partial v}; \\ G &= \left(\frac{\partial X}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial v}\right)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

Диференціюючи вирази (1), після перетворень згідно (2), отримаємо: $E = G = e^{2t \cos \beta}$; $F = 0$. Тоді лінійний елемент конуса, віднесеного до ізотермічної системи, має вигляд:

$$ds = e^{2t \cos \beta} \cdot (dv^2 + dt^2). \quad (3)$$

Розклавши на множники вираз (3) отримаємо:

$$ds = e^{2t \cos \beta} \cdot (dv - i \cdot dt)(dv + i \cdot dt),$$

де i – уявна одиниця.

Прирівнюючи до нуля праву частину останньої рівності, після інтегрування отримаємо:

$$v = i \cdot t + C \quad (4)$$

або

$$v = -i \cdot t + C, \quad (5)$$

де C – довільна стала інтегрування.

Вирази у правій частині рівностей (4) та (5) називають координатами Дарбу (Darboux) [7].

Лінійний елемент (3) конуса визначає довжину будь-якої кривої, яка лежить на його поверхні. Тому при підстановці виразів (4) або (5) у параметричні рівняння конуса (1) отримаємо параметричні рівняння двох сімей уявних ізотропних кривих нульової довжини.

Зокрема, при підстановці виразу (4) у рівняння (1) для кожного значення C отримаємо параметричні рівняння уявної ізотропної кривої, яка лежить на конусі:

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot \cos(i \cdot t + C); \\ y(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot \sin(i \cdot t + C); \\ z(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot \operatorname{tg} \beta. \end{aligned} \quad (6)$$

Для знаходження рівнянь мінімальної та приєднаної до неї мінімальної поверхні для функцій комплексної змінної (6) уведемо заміну [8]: $t = u + i \cdot v$. Тоді отримаємо параметричні рівняння мінімальної поверхні $X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)$:

$$X(u, v) = \operatorname{Re}\{x(u + i \cdot v)\}; Y(u, v) = \operatorname{Re}\{y(u + i \cdot v)\}; Z(u, v) = \operatorname{Re}\{z(u + i \cdot v)\}; \quad (7)$$

та приєднаної поверхні $X^*(u, v), Y^*(u, v), Z^*(u, v)$:

$$X^*(u, v) = \operatorname{Im}\{x(u + i \cdot v)\}; Y^*(u, v) = \operatorname{Im}\{y(u + i \cdot v)\}; Z^*(u, v) = \operatorname{Im}\{z(u + i \cdot v)\}. \quad (8)$$

Відокремивши дійсну та уявну частину для кожної з функцій (6), маємо рівняння мінімальної поверхні:

$$\begin{aligned} X(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\cos(C - v) \cdot \cos(v \cos \beta) \cdot \operatorname{ch}(u) + \sin(C - v) \cdot \sin(v \cos \beta) \cdot \operatorname{sh}(u)]; \\ Y(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\sin(C - v) \cdot \cos(v \cos \beta) \cdot \operatorname{ch}(u) - \cos(C - v) \cdot \sin(v \cos \beta) \cdot \operatorname{sh}(u)]; \\ Z(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\cos(v \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta]; \end{aligned} \quad (9)$$

та приєднаної поверхні:

$$\begin{aligned} X^*(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\cos(C - v) \cdot \sin(v \cos \beta) \cdot \operatorname{ch}(u) - \sin(C - v) \cdot \cos(v \cos \beta) \cdot \operatorname{sh}(u)]; \\ Y^*(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\sin(C - v) \cdot \sin(v \cos \beta) \cdot \operatorname{ch}(u) + \cos(C - v) \cdot \cos(v \cos \beta) \cdot \operatorname{sh}(u)]; \\ Z^*(u, v) &= e^{u \cos \beta} \cdot [\sin(v \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta]. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис.1 та рис.2 зображено мінімальну поверхню, побудовану за рівняннями (9) при $\beta = \frac{\pi}{4}; C = \frac{\pi}{2}$.

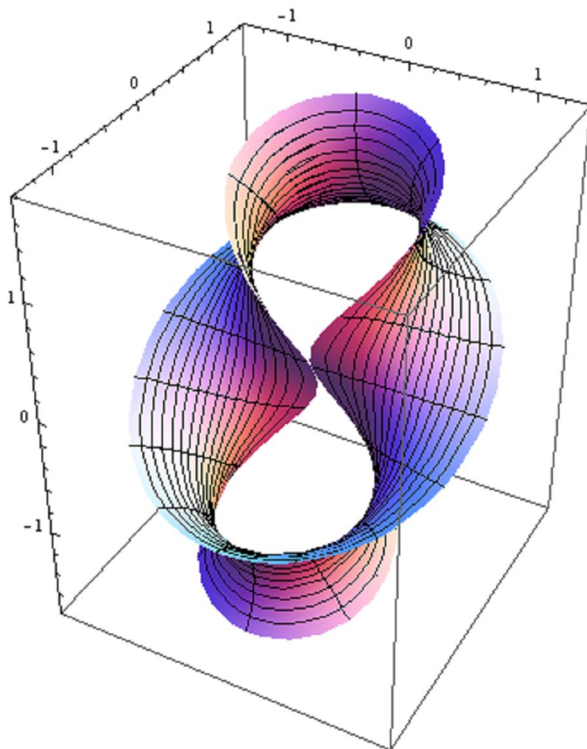


Рис. 1. Мінімальна поверхня, побудована за рівняннями (9)

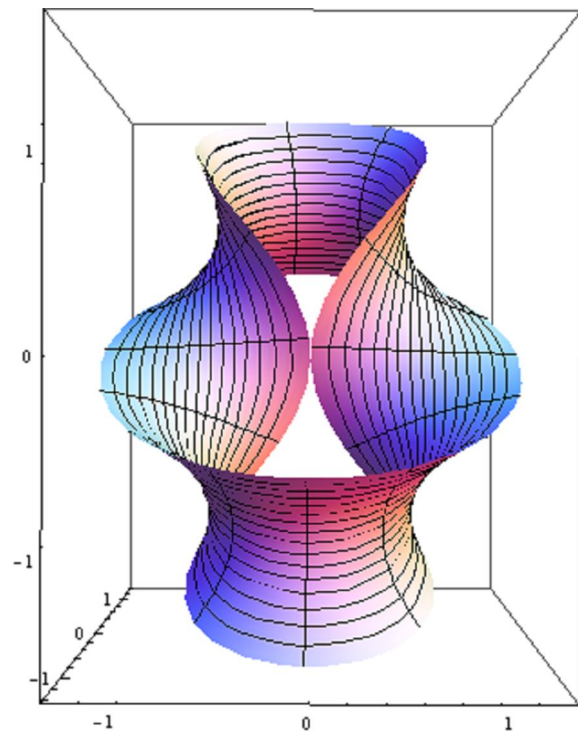


Рис.2. Фронтальна проекція мінімальної поверхні

Приєднана мінімальна поверхня, утворена за рівняннями (10), має форму побудованої на рис. 1 та 2 відповідної мінімальної поверхні, тому її аксонометрія у даній роботі не наводиться.

Коефіцієнти першої квадратичної форми мінімальної поверхні (9) та приєднаної поверхні (10), знайдені за формулами (2), дорівнюють:

$$E = G = e^{2u \cdot \cos \beta} \cdot (ch(u) + sh(u) \cdot \cos \beta)^2; F = 0. \quad (11)$$

Коефіцієнти другої квадратичної форми мінімальної поверхні (9) та приєднаної поверхні (10), знайдені за відомими формулами диференціальної геометрії [8], дорівнюють:

$$N = -L = e^{u \cdot \cos \beta} \cdot \cos(v \cdot \cos \beta) \cdot \sin \beta.$$

Тоді середня кривина поверхонь (9) та (10), обчислена за формулою [8]

$$H = \frac{E \cdot N - 2 \cdot F \cdot M + G \cdot L}{2(E \cdot G - F^2)}, \text{ дорівнює нулеві.}$$

При підстановці виразу (5) у рівняння (1) для кожного значення C отримаємо параметричні рівняння іншої уявної ізотропної кривої, яка лежить на конусі:

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot \cos(-i \cdot t + C); \\ y(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot \sin(-i \cdot t + C); \\ z(t) &= e^{t \cos \beta} \cdot tg \beta. \end{aligned} \quad (12)$$

Використовуючи для функцій комплексної змінної (12) заміну $t = u + i \cdot v$, можна знайти за формулами (7) і (8) параметричні рівняння мінімальної поверхні та приєднаної до неї. Параметричні рівняння вказаних мінімальних поверхонь відрізняються від рівнянь (9) і (10) відповідно, але мають одні й ті самі коефіцієнти першої квадратичної форми (11), тобто допускають згинання одна на одну.

Вираз (3) можна розкласти на множники у вигляді:

$$ds = e^{2t \cdot \cos \beta} \cdot (dt - i \cdot dv)(dt + i \cdot dv) \quad (13)$$

Прирівнюючи до нуля праву частину рівності (13), після інтегрування отримаємо:

$$t = i \cdot v + C \text{ або } t = -i \cdot v + C, \quad (14)$$

Підставивши вирази (14) у параметричні рівняння конуса (1), отримаємо рівняння двох сімей уявних ізотропних кривих нульової довжини. Для кожного значення C за знайденими ізотропними кривими можна побудувати мінімальні поверхні та приєднані до них. Тоді, у параметричних рівняннях мінімальної та приєднаної поверхонь, у порівнянні з виразами (9) і (10) відповідно, змінні t і v "поміняються місцями".

Висновок. На поверхні конуса можна побудувати чотири сім'ї ізотропних ліній і кожній лінії поставити у відповідність мінімальну поверхню та приєднану до неї. Спосіб аналітичного опису уявної ізотропної кривої, яка лежить на поверхні конуса, дозволяє керувати процесом утворення мінімальної поверхні при відокремленні дійсної та уявної частин функції комплексної змінної.

1. Аушева Н.М. Ізотропні багатокутники ізотропних кривих Без'є / Н.М. Аушева // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2011. – № 88. – С.57–61.
2. Аушева Н.М. Моделювання поверхонь Без'є / Н.М. Аушева // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. – Вип.4, т.50. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С.105 – 109.
3. Аушева Н.М. Визначення сім'ї мінімальних поверхонь з напрямною кривою Без'є на базі процесора SIMD-архітектури / Н.М. Аушева, А.А. Демчишин // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. – Вип.4, т.57. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – С.10 – 16.
4. Коровіна І.О. Конструювання поверхонь сталого середнього кривини за заданими лініями інцидентії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.01 "Прикладна геометрія, інженерна графіка" / І.О. Коровіна. – К.: КНУБА, 2012. – 20 с.
5. Пилипака С.Ф. Мінімальні поверхні, отримані з ізотропних кривих / С.Ф. Пилипака, Е.О. Чернишова // Збірник наукових праць КНУДТ (специвипуск): Доповіді третьої кримської науково-практичної конференції "Геометричне та комп'ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн". – К.: ДОП КНУДТ, 2006. – С. 40 – 45.
6. Чернишова Е.О. Використання функцій комплексного змінного для побудови поверхонь технічних форм: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.01 "Прикладна геометрія, інженерна графіка" / Е.О. Чернишова. – К.: КНУБА, 2007. – 20 с.
7. Фиников С.П. Теория поверхностей / Фиников С.П. – М.–Л.: ГТТИ, 1934. – 206 с.
8. Норден А.П. Теория поверхностей / Норден А.П. – М.: ГТТЛ, 1956. – 261 с.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2015.

УДК 621.9.025

О. Р. Онисько, О. В. Зубик*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИННИ ОПУКЛОСТІ ГІПЕРБОЛІЧНОГО ПРОФІЛЮ РІЗЬБОВОГО РІЗЦЯ З НЕНУЛЬОВИМ ЗНАЧЕННЯМ ПЕРЕДНЬОГО КУТА**

В статті розглянуто алгоритм розрахунку стріли опуклості гіперболічного профілю різальної кромки, яка відповідає теоретично точному різьбовому різцю з ненульовим значенням переднього кута. Отримані результати показують на те, що стріла опуклості гіперболічного профілю є здебільшого меншою від величини радіального биття і глибини різання при фасонному алмазному радіальному шліфуванні різальної пластинки різця. Автори дійшли висновку, що найбільш прийнятною для високоточного різьбового різця є прямолінійна різальна кромка, отримана шляхом інтерполяції гіперболічної.

Ключові слова: Стріла опуклості, гіперболічний профіль, різьбовий різець, передній кут, різальна кромка.

Рис. 9. Табл. 1. Літ.11

О. Р. Онисько, О. В. Зубик**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ВЫПУКЛОСТИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ РЕЗЬБОВОГО РЕЗЦА С НЕНУЛЕВЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ПЕРЕДНЕГО УГЛА**

В статье рассматривается алгоритм расчета стрелы выпуклости гиперболического профиля режущей кромки, отвечающей теоретически точному резьбовому резцу с ненулевым значением переднего угла. Полученные результаты показывают, что стрела выпуклости гиперболического профиля в основном есть меньшая чем радиальное биение и глубина резания при фасонном алмазном радиальном шлифовании режущей кромки резца. Авторы пришли к выводу, что наиболее подходящим для высокоточного резьбового резца есть прямолинейная режущая кромка, полученная путем интерполяции гиперболической.

Ключові слова: Стрела выпуклости, гиперболический профиль, резьбовой резец, передний угол, режущая кромка..

O. R. Onysko, O. V. Zubyk**SOFTWARE IMPLEMENTING DETERMINATION OF THE HYPERBOLIC PROFILE CONVEX MAGNITUDE OF THE NON-ZERO RAKE ANGLE THREADING TOOL CUTTING EDGE**

In the article there is the algorithm of the hyperbolic profile cutting edge convexity calculation that appropriate to the theoretically exact threading tool with a non-zero rake angle. The results show that the magnitude of the hyperbolic profile convexity is mostly less than the machine-tool running out of true value and cutting depth on the cutting edge diamond shaped radial cutting grinding. The authors concluded that the straight cutting edge obtained by hyperbolic interpolation is the most appropriate tool for precision threading.

Key words: Convex magnitude, hyperbolic profile, threading tool, rake angle, cutting edge.

Вступ. Нарізання різьбових поверхонь займає важливе місце у технології виготовлення поверхонь труб нафтогазового сортаменту. Якість їх різьбових кінців впливає як на механічні властивості з'єднань, так і на герметичність, а також на багаторазовий процес згвинчування–розгвинчування. Продуктивність процесу різьбонарізання залежить від багатьох факторів, серед яких і значення величини геометричних параметрів різального клину різьбового інструменту.

Актуальність проблеми. В силу різних обставин на сучасних трубних підприємствах домінують різьбонарізні процеси з використанням різьбових різців, різьбових гребінок, а в найбільших компаніях – різьбових різцевих головок. Тож так чи інакше точність формування різьби обсадних чи бурильних труб залежить від точності інструменту. При цьому виготовлення високопродуктивних різців з високоточним профілем різальної кромки ставиться у залежність від технологічної доцільності, тому пошук оптимального поєднання високої продуктивності і одночасно великої точності різьбових різців є актуальним.

Огляд публікацій і запропонованих рішень. Більшість виробників різьбових різців створюють їх із нульовим значенням переднього кута [1,2]. У той сам час дослідження можливостей таких різців вказують на залежність показників якості різьби від геометричних параметрів різьбового інструмента [3,4]. Стійкість різців зі свого боку, теж залежить від величини переднього кута біля вершини інструмента. Небажання виробників застосовувати ненульове значення переднього кута пояснюють відхиленнями від заданого профілю різьби, які виникають при цьому [4,5]. В ряді публікацій запропоновані алгоритми розрахунку гіперболічного профілю

різальної кромки, який функціонально залежить від діаметру різьби та величини переднього кута у вершинній точці інструмента [6,7]. На рисунку 1 показана схема нарізання різцем трикутної різьби, яка вживається у обсадних та бурильних трубах.

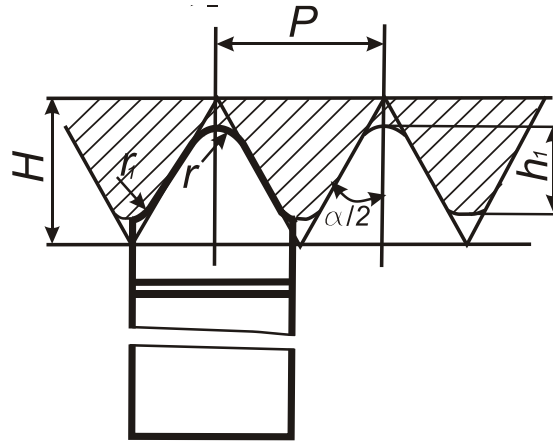


Рис. 1. Схема різьбоутворення трикутної різьби за ГОСТ 632-80 з допомогою різьбонарізного різця

Вказана схема виконана згідно із ілюстрацією, вміщеною у стандарт ГОСТ 632-80 [8]. На основі цього стандарту нижче представлена таблиця 1, яка пояснює схему різьби з позиції термінів та точності виконання елементів різьби.

Таблиця 1. Параметри і граничні відхилення від номінальних розмірів трикутної різьби за стандартом ГОСТ 632-80

Параметр різьби	Норма
Крок різьби P	3,175 мм
Висота вихідного профілю H	2,750 мм
Висота профілю h_1	$1,810_{-0,1}^{+0,05}$ мм
Кут нахилу сторони профілю $\alpha/2$	$30^\circ \pm 1^\circ 15'$
Радіус заокруглення вершини профілю r	$0,508^{+0,045}$ мм
Радіус заокруглення впадини профілю r_1	$0,432^{-0,045}$ мм

На рисунку 2 згідно із [9] зображено схему, на якій жирною лінією показано профіль різальної кромки різьбового різця із ненульовим значенням переднього кута у площині передньої поверхні. Гіперболічною є власне ділянка між точками j та t і симетрична їй відносно осі симетрії права ділянка профілю різьби. Оскільки відомо, що гілки гіперболи, які асимптотично наближаються до своїх асимптот поступово стають максимально випрямленими, то і була запропонована методика прямолінійної інтерполяції гіперболічної різальної кромки за її двома крайніми точками.

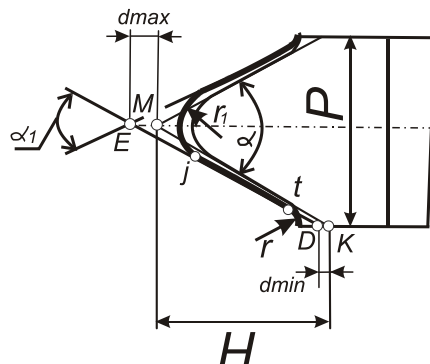


Рис. 2. Вигляд гіперболічного профілю різця у площині передньої поверхні

На рисунку 3 показано фрагмент прикладної програми, запропонований у публікації [7], який наочно підтверджує близькість гіперболічної лінії до прямолінійного відрізка. На рисунку 3 верхня лінія є ділянкою гіперболічного профілю різьби, а нижній прямолінійний відрізок це ділянка профілю різьби за ГОСТ 632–80.

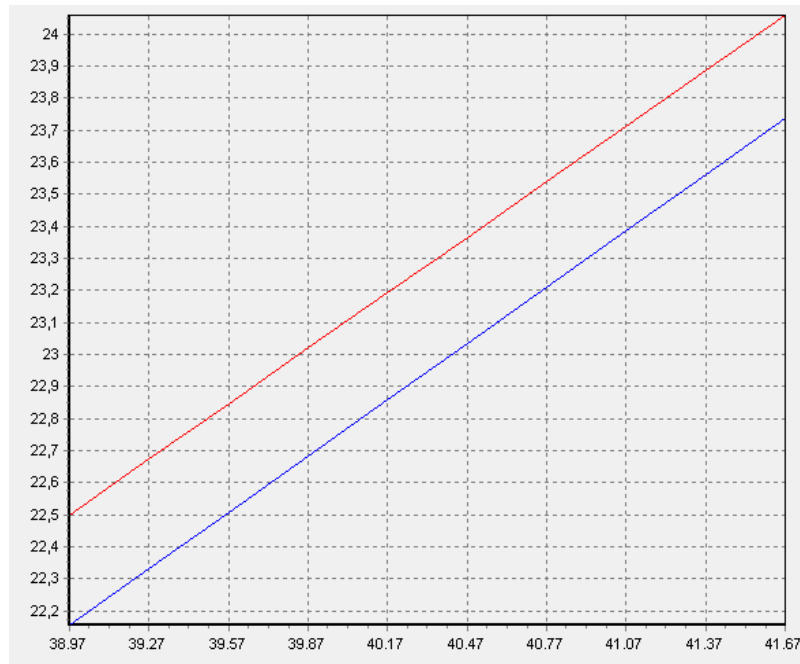


Рис. 3. Профіль гіперболічної різальної кромки (верхня лінія) і бічний профіль заданої за стандартом ГОСТ 632–80 трикутної різьби (нижній профіль)

На рисунку 4 вище проілюстрований графік є доповнений табличними даними де в правому стовпці вказані дані про те, наскільки точки гіперболи (y) відхилені від точок на конусі. Відхилення вказують на «непаралельність» проілюстрованих верхньої і нижньої ліній, що і слід очікувати від асимптотичного наближення. Тим не менше у публікації [9] йдеться про доречність застосування прямолінійності різальної кромки і відтак прийняття у відповідності з цим нового профілю різальної кромки різця. Таке рішення прийняте як очевидне, але тим не менше без розгляду можливостей альтернативи – застосування більш точного гіперболічного профілю. Для отримання такого профілю потрібно мати відповідні технологічні можливості задля чого очевидно потрібно визначити наскільки максимально різниться випрямлена різальна кромка від гіперболічної тобто наскільки вона опукла.

xі	радіус на конусі	y(гіпербола)	відхилення
38.97	22.50	22.16	0.34
39.27	22.67	22.33	0.34
39.57	22.85	22.51	0.34
39.87	23.02	22.68	0.34
40.17	23.19	22.86	0.33
40.47	23.37	23.03	0.33
40.77	23.54	23.21	0.33
41.07	23.71	23.39	0.33
41.37	23.89	23.56	0.32
41.67	24.06	23.74	0.32

Рис. 4. Табличні дані відхилень гіперболи від прямолінійного профілю різьби

профілю різьби H – це відрізок (ML). Крок різьби представлений на схемі відрізком (KL), що відповідає $P/2$.

Отже шукана величина s_i визначатиметься за такою формулою:

$$s_i = R_i - d_i - x_i, \quad (1)$$

де

R_i – радіус i -точки профілю.

$$R_i = R_{\min} + y_i / \tan(\alpha),$$

де

y_i – ордината i -точки профілю.

d_i – величина відхилення гіперболічного профілю від асимптотичного, тобто від заданого профілю різьби у i -точці [6].

$$d_i = \frac{R_{\min}^2 \cdot \sin^2 \gamma}{R_i + \sqrt{R_i^2 - (R_{\min} \sin \gamma)^2}}; \quad (2)$$

x_i – абсциса i -точки профілю.

$$(R_{\min} - d_{\max}) < x_i < (R_{\min} + H - d_{\min});$$

З трикутника ABC маємо наступне співвідношення:

$$x_i - x_{\min} = y_i / \tan(\alpha_1);$$

Виходячи із цього, маємо рівняння:

$$x_i = \frac{y_i}{\tan(\alpha_1)} + R_{\min} - d_{\max},$$

де:

d_{\max} – максимальне значення відхилення гіперболічного профілю різальної кромки від заданого профілю різьби. Його визначають за формулою, яка запропонована у [6]:

$$d_{\max} = \frac{R_{\min} \sin^2(\gamma)}{(1 + \cos \gamma)};$$

α_1 – половинний кут профілю, який визначають за алгоритмом із [9]:

$$\alpha_1 = \frac{P}{2(H + d_{\max} - d_{\min})},$$

де величину d_{\min} визначають за формулою (2), у якій підставляють значення R_i за формулою:

$$R_i = H + R_{\min}.$$

Визначення ординати i -точки ведуть за формулою:

$$y_i = (x_i - R_{\min} + d_{\max}) \tan(\alpha_1).$$

На основі формул (1) і (2) створено алгоритм прикладної програми розрахунку різниці абсцис i -точок на гіперболічному профілю і відповідного йому випрямленому профілю різальної кромки. На рисунку представлені дані таких різниць s_i для точок профілю з координатами y_i з кроком 0,11.

З рисунку 6 бачимо, що найбільшою є різниця $s_i = 0,00044$ мм, яка відповідає точці з ординатою $y_i = 0,8928$ мм.

На рисунку 7 представлений фрагмент тієї ж прикладної програми, що показує дані отримані для труби з діаметром 144 мм і величиною переднього кута 25° .

Як видно із рисунку 7 максимальною різницею є величина 3 мкм. Вона значно більша від попереднього значення оскільки діаметр труби менший, а величина переднього кута значно більша.

si	di	xi	Ri	yi
0,00000	5,37500	152,400	157,80	0,00000
0,00011	5,36900	152,600	158,00	0,11160
0,00021	5,36200	152,800	158,10	0,22320
0,00030	5,35500	153,000	158,30	0,33480
0,00036	5,34800	153,200	158,50	0,44640
0,00040	5,34200	153,400	158,70	0,55800
0,00042	5,33500	153,600	158,90	0,66960
0,00043	5,32800	153,800	159,10	0,78120
0,00044	5,32100	154,000	159,30	0,89280
0,00041	5,31500	154,200	159,50	1,00400
0,00037	5,30800	154,400	159,70	1,11600
0,00031	5,30200	154,600	159,90	1,22800
0,00024	5,29500	154,800	160,10	1,33900
0,00015	5,28800	155,000	160,30	1,45100
0,00004	5,28200	155,200	160,50	1,56200

Рис. 6. Дані прикладної програми отриманої для даних: діаметр труби – 320 мм, величина переднього кута 15°

si	di	xi	Ri	yi
0,00000	6,53600	63,220	69,76	0,00000
0,00076	6,51700	63,420	69,94	0,10510
0,00140	6,49800	63,620	70,12	0,21020
0,00200	6,48000	63,820	70,30	0,31520
0,00240	6,46100	64,020	70,49	0,42030
0,00270	6,44300	64,220	70,67	0,52540
0,00290	6,42500	64,420	70,85	0,63050
0,00300	6,40700	64,620	71,03	0,73560
0,00300	6,38900	64,820	71,21	0,84060
0,00290	6,37100	65,020	71,40	0,94570
0,00270	6,35300	65,220	71,58	1,05100
0,00240	6,33600	65,420	71,76	1,15600
0,00200	6,31800	65,620	71,94	1,26100
0,00140	6,30000	65,820	72,12	1,36600
0,00082	6,28300	66,020	72,31	1,47100
0,00010	6,26600	66,220	72,49	1,57600

Рис. 7. Дані прикладної програми отриманої для даних: діаметр труби –144 мм, величина переднього кута 25°

si	di	xi	Ri	yi
0,00000	0,53290	54,230	54,76	0,00000
0,00009	0,53100	54,430	54,96	0,11440
0,00016	0,52900	54,630	55,15	0,22880
0,00022	0,52710	54,830	55,35	0,34320
0,00027	0,52520	55,030	55,55	0,45760
0,00030	0,52330	55,230	55,75	0,57200
0,00032	0,52150	55,430	55,95	0,68640
0,00032	0,51960	55,630	56,15	0,80080
0,00032	0,51780	55,830	56,34	0,91520
0,00030	0,51590	56,030	56,54	1,03000
0,00026	0,51410	56,230	56,74	1,14400
0,00022	0,51230	56,430	56,94	1,25800
0,00015	0,51050	56,630	57,14	1,37300
0,00008	0,50870	56,830	57,33	1,48700

Рис. 8. Дані прикладної програми отриманої для даних: діаметр труби –114 мм, величина переднього кута 8° .

Доволі показовим є фрагмент прикладної програми проілюстрований на рисунку 8. Це дані, що відповідають діаметру труби – 114 мм і величині переднього кута різця – 8° . Отримана різниця si сягає свого максимального значення в околі величини – 0,00032 мм. у точці з ординатою $y_i=0,8008$ мм.

У публікації [11] йдеться про фасонне алмазне шліфування твердосплавних пластинок, яке має місце у технологічному процесі виготовлення різбових різців для нарізання різб нафтогазового сортаменту. Технічні можливості по глибині різання алмазними кругами на металічній зв'язці орієнтують на мінімальну глибину різання 0,0025 мм., яка є значно більше аніж максимальна різниця – 0,00032мм, що впливає із рисунку 8, чи – 0,00044 з рисунку 6. Така величина є співвимірною із різницею 0,003 мм із рисунка 7, але при цьому величина переднього кута дорівнює 25° , що не є рекомендовано у жодних джерелах. Але навіть при максимальній різниці величиною 0,003 мм слід врахувати, що вона є або співвимірною або і менша від величини радіального биття верстату.

Усі вказані максимальні значення si можна використати для аналізу можливості виконання криволінійного гіперболічного профілю різальної кромки для можливостей контурного її шліфування. Не менш важливим для такого аналізу є визначення стріли опуклості гіперболічного профілю. На рисунку 9 показано схему розрахунку стріли опуклості.

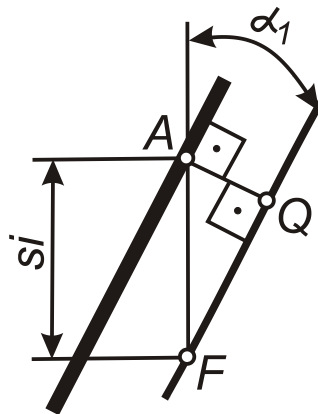


Рис. 9. Схема для визначення стріли опуклості гіперболічного профілю різальної кромки різбового різця.

На рисунку 9 лінія FQ відповідає ділянці гіперболи в районі найбільшого значення величини si . Саме в цьому околі гіпербола є найбільше віддалена від інтерпольованої прямої і відрізок AQ тому є найдовшим з усіх відрізків, що проходять під прямим кутом до прямолінійного профілю і сполучає його із гіперболічним профілем. Цей відрізок власне і є стрілою випуклості гіперболічного профілю різальної кромки.

Із міркувань самої побудови, можна із певною допущенністю вважати, що у районі точки Q обидва профілі: прямолінійний і гіперболічний є паралельними лініями. Виходячи з цього маємо наступну форму розрахунку величини відрізка AQ :

$$|AQ| = |AF| \cos(\alpha_1);$$

Оскільки величина кута α_1 є близькою до 30° , то можна приблизно визначити величину стріли випуклості, як половину отриманої у прикладній програмі величини si . Отримані дані є необхідні для прийняття рішення про технологічні можливості відтворення різальної кромки: чи варто зосереджуватися на її гіперболічному профілю, а чи доцільніше його інтерполювати у прямолінійну.

Висновки. Дані, отримані від використання прикладної програми для визначення величини опуклості гіперболічного профілю різальної кромки різбового різця з ненульовим значенням переднього кута для виготовлення трикутної різби труб нафтогазового сортаменту свідчать про наступне:

- стріла опуклості сягає розміру 3 мкм для нафтогазових труб з найменшим діаметром і величиною переднього кута до 25° .

- стріла опуклості тенденційно зменшується із ростом діаметру труб і зменшенням значення переднього кута і навпаки.
- аналіз технологічних можливостей профільного алмазного шліфування твердосплавних різьбових пластин вказує на неспроможність виконувати гіперболічний криволінійний профіль різальної кромки різьбових різців;
- прямолінійний профіль різальної кромки, що отриманий внаслідок інтерполяції гіперболічного профілю максимально відхиляється від останнього на величину, яка дорівнює величині стріли опуклості гіперболи є найбільш прийнятний для виготовлення точних різьбових різців.

1. Ultra-rigid thread turning for all types of threads – internal and external. [Електронний ресурс]: – Електорон. дан. (1 файл). Sandvik Coromant. Site. Режим доступу: www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/corothread_266/Pages/default.aspx. – Назва з екрана.
2. Katalog 2011-2012 ZCC-CT. Гедион-Альфа Официальный дистрибутор инструмента ZCC-CT в России. [электронный ресурс]: – електорон. дан.–М.: «Гедион Альфа», 2013 (1 файл). Режим доступа: www.g-alfa.ru/tochenie_2012.pdf – Назва з екрана
3. Прокофьев А. Н. Технологическое обеспечение и повышение качества резьбовых соединений [Текст]: дис. докт. техн. наук: 05.02.08: защищена 01.07.08/ Прокофьев Александр Николаевич – Брянск, 2008. – 304 с. – Библиогр.: С. 298–302.– 00319276.
4. Фомин Е. В. Повышение стойкости и точности резьбовых резцов на основе моделирования процесса резьбонарезания [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.03.01: защищена 22.03.07: утв. 24.09.07 / Фомин Евгений Владимирович – М., 2007. – 206 с. – Библиогр.: С. 194–202. – 003653715.
5. Бобров В. Ф. Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом [текст] / В. Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1982. – 104 с.
6. Онисько О. Р. Розрахунок гіперболічного профілю різальної кромки різця для виготовлення різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту.[Текст]/О.Р.Онисько//Прикарпатський вісник НПШ. – Івано-Франківськ–2014. –№1(25)– С.126–137.
7. Онисько О. Р. Програмна реалізація розрахунку форми різальної кромки різьбового різця залежно від значення величини його переднього кута та діаметра різби [Текст] / О.Р.Онисько, Л. О.Борушак, С.О.Рязанов//Вісник національного університету «Львівська політехніка» –2013. – № 772.– С. 129–134.
8. ГОСТ 632–80. Межгосударственный стандарт. Трубы обсадные и муфты к ним [Текст]. Разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР, нефтяной промышленности СССР. Утвержден и внесен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05.06.80 № 2578. Взамен ГОСТ 632–64. Издание (апрель 2010 г.) с Изменением № 1, №2, №3, №4 утвержденными в октябре 1982 г., январе 1986 г., январе 1988 г., мае 1989 г. июле 1992 г. (ИУС 2-83, 5-86, 4-88,8-89); М.: «Стандартинформ», 2010. – 75 с.
9. Онисько О. Р. Різьбові різці з відкоректованою за значенням переднього кута прямолінійною різальною кромкою [Текст] / О. Р. Онисько, В. Г. Панчук, В. В. Врюкало // Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування»–Донецьк: ДНУЗ «Донецький національний технічний університет»–2014.–№2(48)–С.10–14.
10. Грановский Г. И. Фасонные резцы [Текст]. Г. И. Грановский, К. П. Панченко // М.: Машиностроение.–1975.– С. 309.
11. 4. Каменецкий Л. И. Твердосплавный резьбонарезной инструмент для обработки резьб нефтяного и газового ассортимента // Сфера. Нефтегаз. Трубы. Трубопроводы. Всероссийский отраслевой информационно-технический журнал. СПб.: 2010 № 2 – С. 182–183.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2015.

УДК 514.18

С. Ф. Пилипака, А. В. Несвідомін
МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ ПО ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ
ОДНОПОРОЖНИННОГО ГІПЕРБОЛОІДА ОБЕРТАННЯ

Розроблено maple-модель руху частинки по шорсткій внутрішній поверхні нерухомого однопорожнинного гіперboloїда обертання. Наведено результати комп'ютерних експериментів побудови траєкторних кривих, швидкості частинки та нормальної реакції в залежності її початкової швидкості, напрямку кидання та коефіцієнта зовнішнього тертя.

Ключові слова: однопорожнинний гіперboloїд, частинка, закон руху, траєкторія, швидкість.
Рис. 8. Літ. 3.

С. Ф. Пилипака, А. В. Несвидомин
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ПО ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ОДНОПОЛОСТНОГО ГИПЕРБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ

Разработана maple-модель движения частицы по шероховатой внутренней поверхности неподвижного однополостного гиперboloида вращения. Приведены результаты компьютерных экспериментов построения траекторных кривых, скорости частицы в зависимости ее начальной скорости, направления бросание и коэффициента внешнего трения.

Ключевые слова: однополостный гиперboloида, частица, движение, траектория, скорость.

S. F. Pylypaka, A. V. Nesvidomin
SIMULATION OF PARTICLE MOTION ROUGH SURFACE ONE-SHEETED HYPERBOLOID

Maple-developed model of a particle in the rough inner surface of the real hyperboloid of revolution. The results of computer experiments construction trajectory, particle velocity based its initial velocity, direction and throwing coefficient of external friction.

Key words: hyperboloid, particle, motion, trajectory, speed.

Постановка проблеми. Сучасні методи обґрунтування технологічних процесів сепарації, переміщення та розкидання с.г. матеріалів повинні базуватися на комп'ютерному моделюванні руху частинки по шорстких поверхнях, яке зводиться до формування та розв'язування досить складних диференціальних рівнянь 2-го порядку, побудови траєкторії частинки, визначення її швидкості, нормальної реакції тощо. Рішення цієї проблеми потребує розробки відповідних програмних додатків до систем комп'ютерної графіки та математики, зокрема символічної алгебри Maple [1].

Аналіз останніх досліджень. Класичні дослідження руху частинки по шорстких поверхнях для задач проектування с.г. робочих органів розглянуто в монографії [2]. Для опису рівноваги діючих сил на рухому частинку по шорсткій поверхні взято супровідні тригранники вздовж її траєкторії [3].

Формулювання мети статті. Якщо кинути частинку на будь-яку шорстку поверхню, то вона під дією сили тяжіння буде рухатися в напрямку найнижчої її точки. Траєкторія частинки та її кінематичні властивості залежать від величини коефіцієнта зовнішнього тертя f , початкової швидкості V_0 , кута α_0 кидання та параметрів форми і положення поверхні. За цими вихідними умовами розробимо maple-модель формування закону руху частинки по шорсткій внутрішній поверхні однопорожнинного гіперboloїда обертання та наведемо результати обчислювальних досліджень її траєкторно-кінематичних параметрів в залежності часу.

Основна частина. Одно-порожнинний гіперboloїд обертання $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$ з вертикальною віссю Oz в декартовій системі координат $Oxyz$ утворимо обертанням навколо осі Oz твірної гіперболи $\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$ в площині Oxz :

$$R(u, v) = R \left[\frac{a\sqrt{b^2 - v^2} \cos(u)}{b}, \frac{a\sqrt{b^2 + v^2} \sin(u)}{b}, v \right], \quad (1)$$

де: a, b – параметри форми твірної гіперболи;

$u \in \left[\frac{\pi}{2}; 2\pi \right], v \in [v_0; v_T]$ – незалежні криволінійні координати поверхні.

Горизонтальне та похиле положення поверхні однопорожнинного гіперboloїда (1) в декартовій системі координат $Oxyz$ здійснено обертанням $R(u, v)$ на кут ξ навколо осі Ox :

$$R(u, v) = R \left[\frac{a\sqrt{b^2+u^2} \cos(v)}{b}, \frac{a\sqrt{b^2+u^2} \sin(v) \cos(\xi) - bu \sin(\xi)}{b}, \frac{a\sqrt{b^2+u^2} \sin(v) \sin(\xi) - bu \cos(\xi)}{b} \right]. \quad (2)$$

Розроблена тапле-модель автоматично формує послідовність виведення закону руху частинки по шорсткій поверхні однопорожнинного гіперboloїда обертання, яка є досить громіздкою. Тому не повторюватимемо ці аналітичні викладки, а наведемо тільки результати проведених обчислювальних експериментів дослідження руху частинки за різними вихідними умовами.

Рух частинки по шорсткій внутрішній поверхні вертикального однопорожнинного гіперboloїда обертання (1) може відбуватися тільки у верхній його частині, оскільки поблизу горловини частинка неодмінно відірветься від поверхні. На рис.1 побудовано траєкторії $r(t)$ частинки, графіки її швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ за різним кутом кидання $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ за наступних вихідних умов: параметрами форми $a = 1$ і $b = 1$ напрямної гіперболи; початкової швидкості $V_0 = 4$ м/с частинки; її початковим положенням $u_0 = \pi$, $v_0 = 3$; коефіцієнтом тертя $f = 0.3$. Побудовані зображення демонструють, що частинки не зупиняться на поверхні і всі вони будуть відриватися від неї не доходячи до горловини - нормальна реакція $F_N(t)$ наближається до нуля. Найшвидше відірветься частинка кинута під кутом $\alpha_0 = 135^\circ$ - через проміжок $t \approx 1.2$ с. Частинки кинуті під кутами $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ відірвуться від поверхні майже через однаковий проміжок часу $t \approx 1.5$ с і майже з однаковою швидкістю $V \approx 6$ м/с.

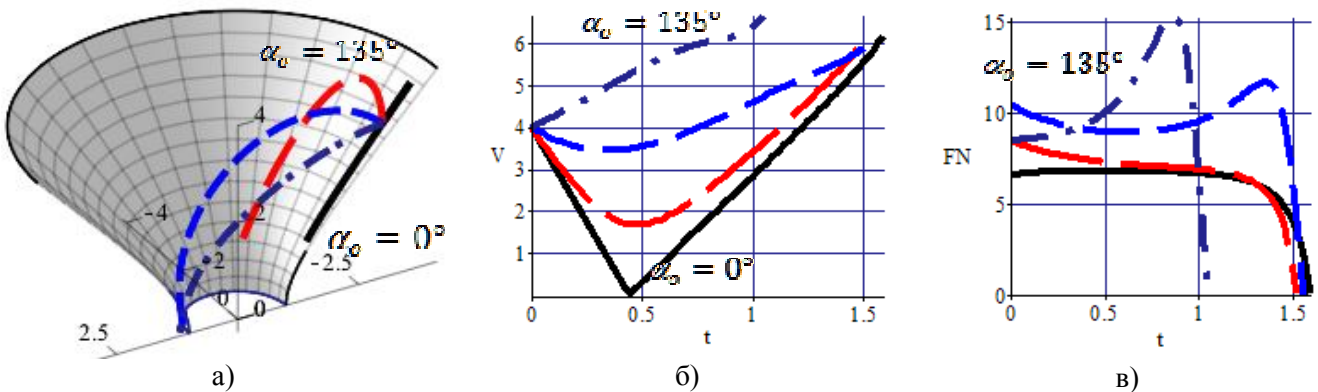


Рис. 1. Траєкторії $r(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності кута кидання α_0

На рис.2 побудовано траєкторії $r(t)$ частинки, графіки її швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ за різним коефіцієнтом тертя $f = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ при постійному куту кидання $\alpha_0 = 90^\circ$. Частинка з коефіцієнтом тертя $f = 0.1$ буде рухатися по поверхні без відриву близько $t \approx 3.5$ с, що майже в двічі довше за частинку з коефіцієнтом тертя $f = 0.3$ - $t \approx 1.7$ с. Хоча, частинки з коефіцієнтами тертя $f = 0.2, 0.3, 0.4$ будуть відриватися від поверхні приблизно через однаковий часовий проміжок $t \approx 1.4..1.8$ с.

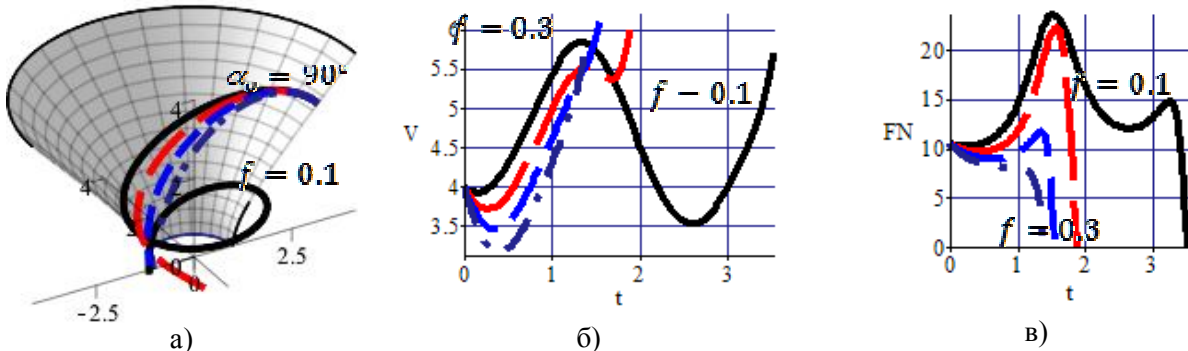


Рис.2. Траєкторії $r(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності коефіцієнта тертя f

На рис. 3 побудовано траєкторії $\mathbf{r}(t)$ частинки, графіки її швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ за різною початковою швидкістю $V_0 = 2, 4, 6, 8 \text{ м/с}$ – при постійних значеннях коефіцієнта тертя $f = 0.3$, куту кидання $\alpha_0 = 90^\circ$ і початковому положенні $v_0 = 3$ частинки. При початковій швидкості $V_0 = 2$ частинка відірветься від поверхні через проміжок часу $t \cong 1.1 \text{ с}$. При збільшенні початкової швидкості V_0 частинки в двічі, час t її руху по поверхні вже не збільшується в двічі. Звернемо також увагу, що швидкість відриву частинок майже не залежить від її початкової швидкості V_0 - рівняється $V_{\text{в}} \cong 6 \text{ м/с}$.

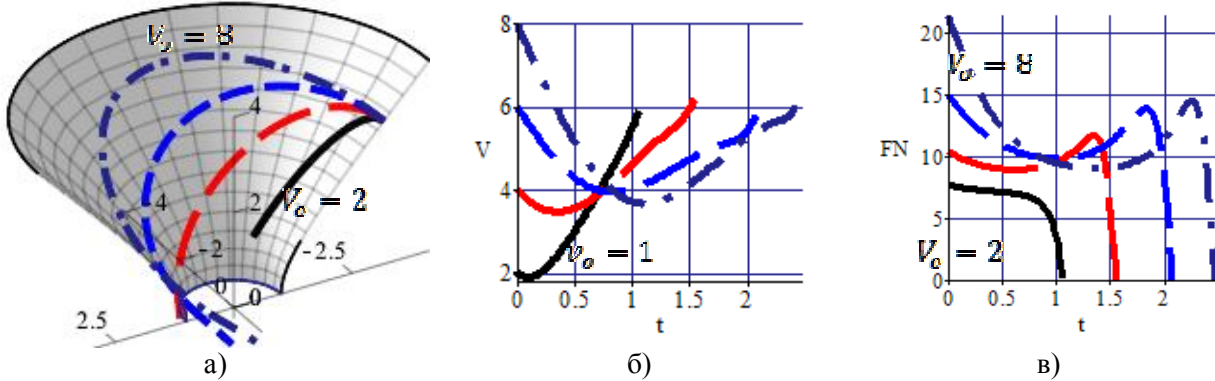


Рис.3. Траєкторії $\mathbf{r}(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності початкової швидкості V_0

На рис. 4 побудовано траєкторії $\mathbf{r}(t)$ частинки, графіки її швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ за різним її початковим положенням $v_0 = 1, 2, 3, 4$ – внутрішній v -координаті на твірній гіперболи та при постійних значеннях коефіцієнта тертя $f = 0.3$, куту кидання $\alpha_0 = 90^\circ$ і початкової швидкості $V_0 = 4 \text{ м/с}$ частинки. Так частинка, яка знаходиться до горловини найближче ($v_0 = 1$) відірветься від поверхні найпершою ($t \cong 0.7 \text{ с}$) із найменшою швидкістю відриву $V_{\text{в}} \cong 4.1 \text{ м/с}$.

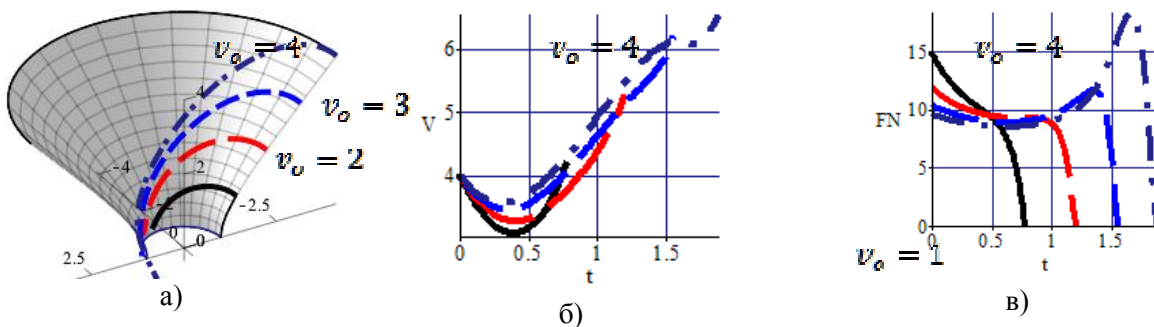


Рис. 4. Траєкторії $\mathbf{r}(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності початкового положення v_0

Нехай параметри форми гіперboloїда обертання рівняються: $a = 4$ і $b = 1$. На рис.5 побудовано траєкторії $\mathbf{r}(t)$ частинки, графіки її швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ за різним куту кидання $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ за наступних вихідних умов: початкова швидкість $V_0 = 4 \text{ м/с}$; початкове положення $u_0 = \pi$, $v_0 = 3$; коефіцієнт тертя $f = 0.3$.

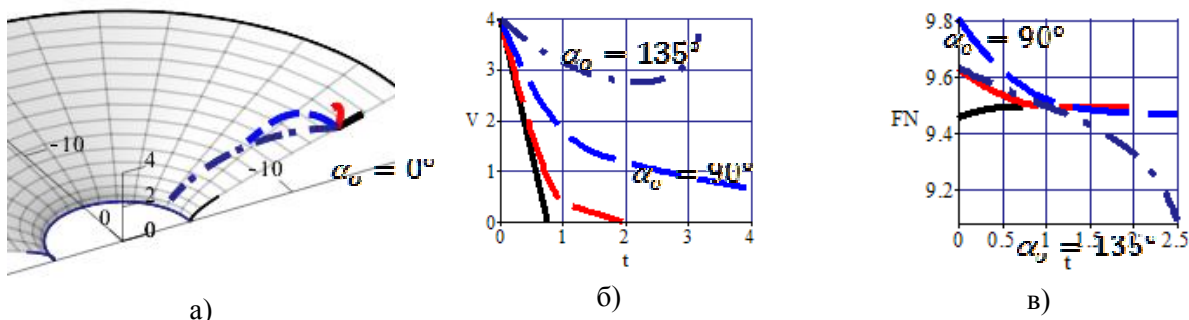


Рис.5. Рух частинки по поверхні гіперboloїда обертання: а) траєкторії $\mathbf{r}(t)$; б) швидкість $V(t)$; в) нормальна реакція $F_N(t)$

Оскільки $\frac{b}{a} < f$, то тільки частинка кинута в напрямку горловини ($\alpha_0 = 135^\circ$) не зупиниться на поверхні. Якщо початкове положення частинок взяти ще на більшій відстані від горловини гіперboloїда, наприклад, $v_0 = 4$, тоді вже всі частинки зупиняться на поверхні при вище прийнятих вихідних умовах її кидання.

На рис.6 побудовано траєкторії $r(t)$, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ руху частинки по шорсткій внутрішній поверхні гіперboloїда обертання з горизонтальною віссю ($\xi = 90^\circ$) в залежності кута кидання $\alpha_0 = 90^\circ, 120^\circ, 160^\circ, 180^\circ$ за вихідними початковими умовами: положенням $u_0 = 90^\circ, v_0 = 1$; швидкості $V_0 = 4$ м/с; параметрами форми $a = 1$ і $b = 1$ напрямної гіперболи та коефіцієнтом тертя $f = 0.3$. Побудовані зображення демонструють, що не одна із частинок не відірветься від поверхні ($F_N(t) > 0$) і після деякого зменшення їх швидкості $V(t)$ починають їх набирати. В залежності від початкових умов кидання, деякі частинки можуть переміститися по іншу сторону горловини гіперboloїда обертання - траєкторії $r(t)$ частинок з кутом кидання $\alpha_0 = 160^\circ, 180^\circ$ перетинають горловину поверхні.

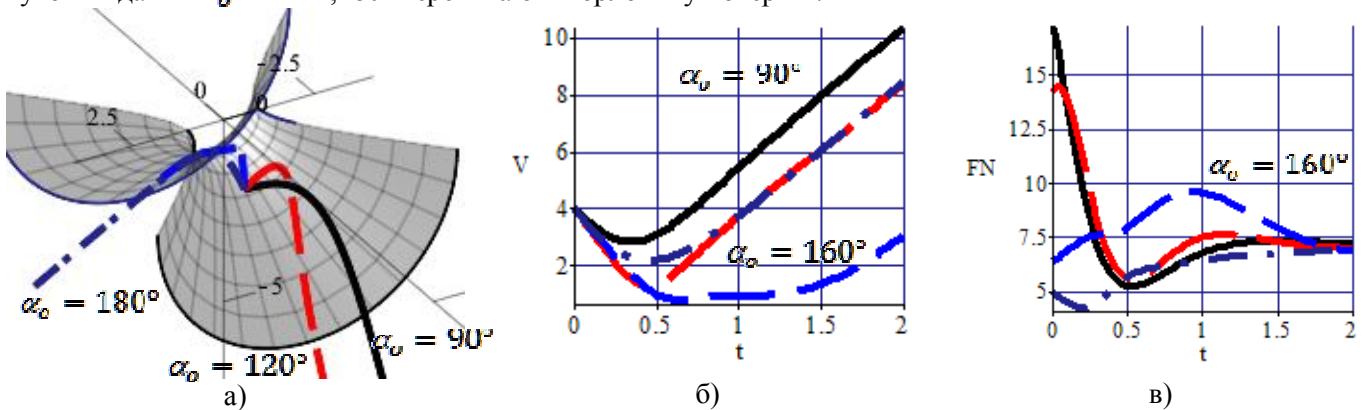


Рис.6. Траєкторії $r(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності кута кидання α_0

На рис.7 побудовано траєкторії $r(t)$ та графіки швидкості $V(t)$ руху частинки по поверхні гіперboloїда обертання з горизонтальною віссю в залежності: а) коефіцієнта тертя $f = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$; б) початкової швидкості $V_0 = 2, 4, 6, 8$ м/с; в) початкового положення $v_0 = 1, 2, 3, 4$, якщо кут кидання частинок постійний і дорівнює $\alpha_0 = 90^\circ$.

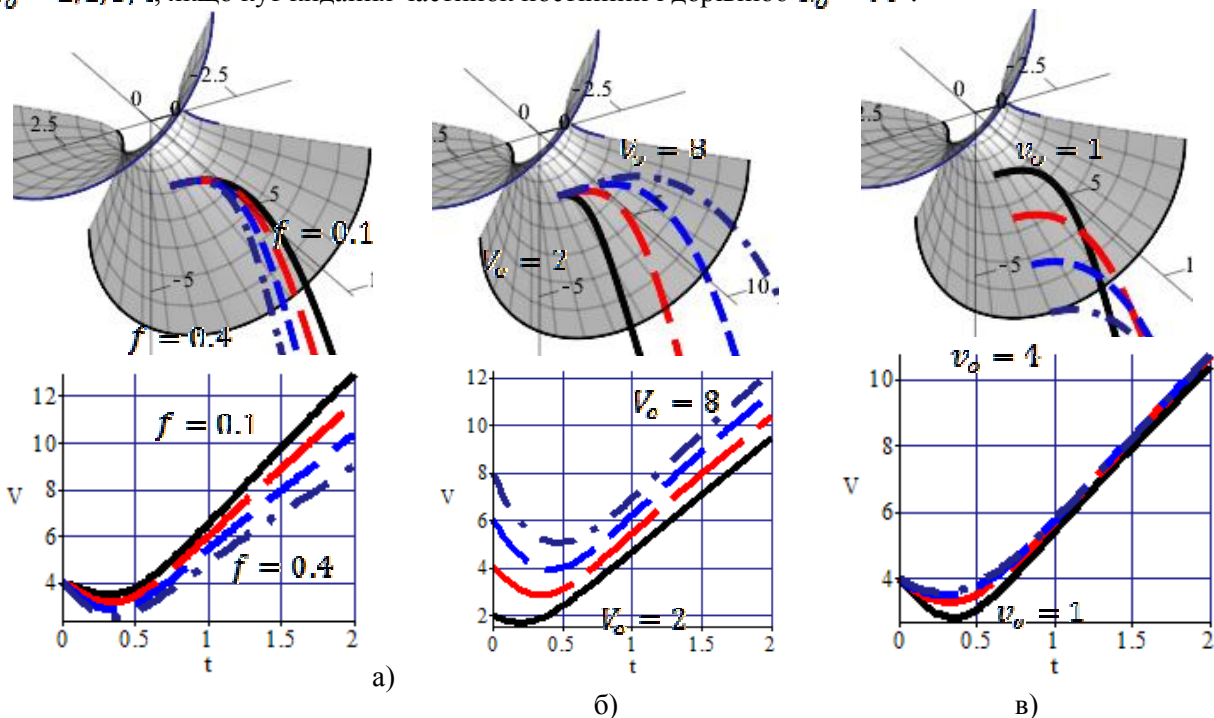


Рис. 7. Траєкторії $r(t)$ та графіки швидкості $V(t)$ руху частинки по поверхні гіперboloїда обертання з горизонтальною віссю в залежності: а) коефіцієнта тертя f ; б) початкової швидкості V_0 ; в) початкового положення v_0

Можна стверджувати, що суттєвий вплив коефіцієнта тертя f відбувається після розгону частинки на поверхні. Якщо на початку руху різниця в початковій швидкості V_0 частинок рівнялася 2 м/с , то вже через проміжок часу $t = 1\text{с}$ ця різниця зменшилася до значення $\cong 0.5 \text{ м/с}$. Частинки кинуті з різних місць v_0 вздовж меридіана у вертикальній площині, через проміжок часу $t = 1\text{с}$ мають майже однакову швидкість $\cong 5.8 \text{ м/с}$.

Нахилимо вісь гіперboloїда обертання на кут $\xi = 60^\circ$ від вертикального положення та змінимо параметри форми напрямної гіперболи - $a = 1$ і $b = 2$ (рис.8). При початковій швидкості $V_0 = 4 \text{ м/с}$, коефіцієнта тертя $f = 0.3$ та початковому положенні $v_0 = 1$ тільки частинки кинуті під кутом $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ$ у верхній частині горловини поверхні гіперboloїда обертання там же і зупиняться, на відміну від частинок кинутих під кутом $\alpha_0 = 90^\circ, 135^\circ$.

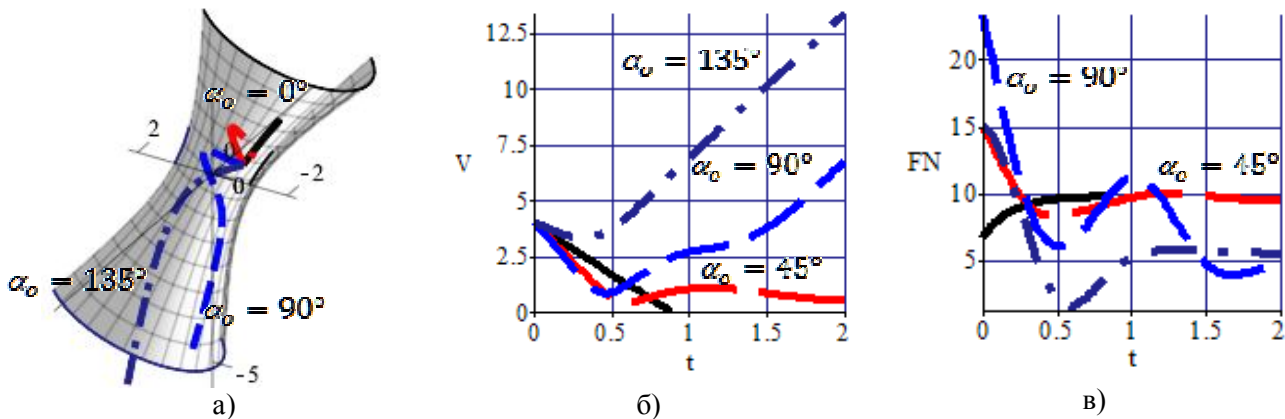


Рис. 8. Траєкторії $r(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності кута кидання α_0

Нехай частинки мають однакову початкову швидкість $V_0 = 4 \text{ м/с}$, кут кидання $\alpha_0 = 90^\circ$, та коефіцієнт тертя $f = 0.3$, але різні положення $v_0 = 1, 2, 3, 4$ вздовж меридіана гіперboloїда обертання (рис.9). За цих умов тільки частинки з початковим положенням $v_0 = 3, 4$ зупиняться у верхній частині гіперboloїда обертання, на відміну від частинок, які знаходилися по ближче до горловини ($v_0 = 1, 2$).

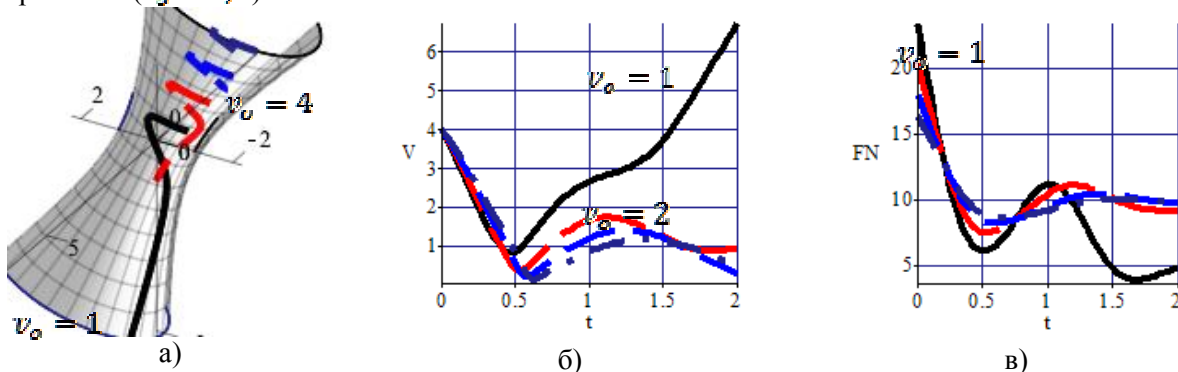


Рис. 9. Траєкторії $r(t)$ частинки, графіки швидкості $V(t)$ та нормальної реакції $F_N(t)$ в залежності початкового положення v_0

Висновки. Результати обчислювальних експериментів з аналізу руху частинок по шорсткій поверхні однопорожнинного гіперboloїда показують складний взаємовплив параметрів її положення та вихідних умов кидання.

1. Аладьев В. З. Программирование и разработка приложений в Maple / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно: ГрГУ, 2007. – 458 с.
2. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П. М. Василенко. – К.: УАСХН, 1960. – 283 с.
3. Пилипака С. Ф. Тригранник і формули Френе: теорія складного руху матеріальної точки та задачі на кінематику і динаміку при її русі по шорстких поверхнях / С. Ф. Пилипака // Академік П. М. Василенко – яскравий погляд у майбутнє. – К.: Хай-Тек Прес, 2010. – С.297–397.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2015.

Т. С. Пилипака ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОРМИ СПІРАЛЬНОЇ ПРУЖИНИ

В роботі розглянуто значний прогин статично визначених тонких стержнів під дією прикладеної сили. Наведені диференціальні рівняння пружної осі стержнів, закріплених у вигляді консолі. Здійснено чисельне інтегрування рівнянь і побудовано криві – пружні осі зігнутих стержнів. Запропоновано пружну вісь спіральної пружини.

Ключові слова: тонкий стержень, пружна вісь, консоль, диференціальне рівняння, спіральна пружина.

Т. С. Пилипака УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФОРМЫ СПИРАЛЬНОЙ ПРУЖИНЫ

Рассмотрен значительный прогиб статически определенных тонких стержней под действием приложенной силы. Приведены дифференциальные уравнения упругой оси стержней, закрепленных у виде консоли. Сделано численное интегрирование уравнений и построены кривые – упругие оси согнутых стержней. Предложено упругую ось спиральной пружины.

Ключевые слова: тонкий стержень, упругая ось, консоль, дифференциальное уравнение, спиральная пружина.

T. S. Pylypaka REFINEMENT OF THE FORM OF A SPIRAL SPRING

The significant sag of statically defined thin rods under an operation of applied forces surveyed. The differential equations of an elastic axis of rods, timbered at an aspect of a cantilever are reduced. The numerical integration of the equations is made and curves - elastic axes of the bent rods built. It is offered an elastic axis of a spiral spring.

Key words: thin rod, elastic axis, cantilever, differential equation, spiral spring.

Постановка проблеми. Під дією зовнішнього навантаження прямолінійна вісь стержня згинається, перетворюючись у криву лінію. У несучих конструкціях стержні розраховуються таким чином, щоб їх прогини були мінімальними і не виходили за певні межі. Тому для практичних розрахунків прогину стержнів точне рівняння зігнутої осі стержня замінюють спрощеним лінійним диференціальним рівнянням пружної лінії, яке носить назву основного [1]. Воно дає прийнятні для практики переміщення стержня для малих деформацій при будь-яких видах навантаження. Однак є випадки, коли тонкий стержень сильно згинається при роботі матеріалу в межах пружності (спіральні пружини, акумулятори потенціальної енергії та ін.). В таких випадках переміщення при згині стають співрозмірними із довжиною самої деталі. Тут спостерігається нелінійна залежність великих переміщень від дії зовнішніх сил, хоча матеріал працює пружно [2]. Поведінка пружних деталей з великими прогинами не може бути вивчена за допомогою лінійної теорії згину.

Аналіз останніх досліджень. В підручниках із опору матеріалів [1], в працях з теорії пружності [3] детально розглянута лінійна теорія згину балок при їх невеликих переміщеннях. Для несучих конструкцій, де норми прогину складають 0,01...0,001 прольоту [1] це виправдано, оскільки заміна точного диференціального нелінійного рівняння другого порядку зігнутої осі балки на спрощене лінійне значно полегшує розрахунки і дає досить точні результати. При розрахунку значних прогинів пружних деталей потрібно користуватися спеціальною літературою [2, 4], яка не є такою поширеною, як перша. Значна деформація пружних деталей при дотриманні закону Гука в деякій літературі носить назву нелінійного згину [4]. Такий згин характерний для спіральних пружин.

Формулювання мети статті. Визначити фактори впливу на форму тонкого консольно закріпленого стержня під дією зовнішньої зосередженої сили та використати їх для вдосконалення форми спіральної пружини.

Основна частина. Будемо вважати, що матеріал стержня при деформації працює в межах пружності, тобто при припиненні дії сили він відновлює свою початкову прямолінійну форму і довжина його не змінюється. Розглянемо випадок, коли стержнем є консоль, закріплена в точці A і яка згинається під дією зосередженої сили P , прикладеної до її кінця (рис. 1,а).

Силою ваги стержня нехтуємо, оскільки вона набагато менша за силу P і її вплив на деформацію стержня буде незначний. Це буде ще більш справедливо, якщо розглядати прогин стержня не у вертикальній, а у горизонтальній площині. Будемо вважати, що сила P під час пружної деформації стержня змінює свій напрям, весь час залишаючись перпендикулярною до пружної осі в кінці стержня. Отже, момент знайдемо із виразу $M = -Ps$, де s – поточна довжина стержня. Під дією прикладеного моменту стержень зігнеться і його пружна вісь набуде криволінійної форми. Розподіл кривини вздовж осі стержня буде функцією його довжини: $k = k(s)$.

Із курсу опору матеріалів відомо, що кривина пружної осі прямо пропорційна прикладеному моменту M і обернено пропорційна жорсткості стержня EJ [1]:

$$k = \frac{M}{EJ}, \tag{1}$$

де E – модуль Юнга;
 J – момент інерції плоского перерізу стержня.

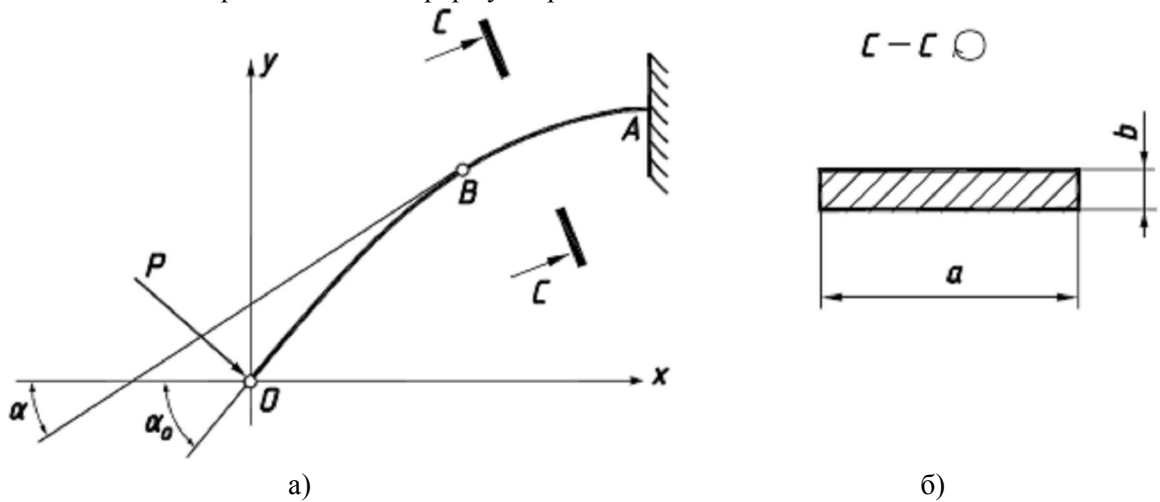


Рис. 1. До визначення прогину тонкого стержня під дією сили P :
 а) форма пружної осі стержня, б) форма поперечного перерізу стержня

При прямокутному перерізі стержня із сторонами a і b (рис. 1,б) момент інерції запишеться:

$$J = \frac{ab^3}{12} \tag{2}$$

Після підстановки у (1) моменту інерції (2) і моменту сили $M = -Ps$ отримаємо залежність кривини $k = k(s)$, тобто натуральне рівняння пружної осі:

$$k = -\frac{12P}{Eab^3} s. \tag{3}$$

Перехід від натурального до параметричних рівнянь будемо здійснювати за відомими формулами диференціальної геометрії [5]:

$$x = \int \cos \alpha ds; \quad y = \int \sin \alpha ds, \tag{4}$$

де α – поточне значення кута між віссю Ox і дотичною до пружної осі в поточній точці B (рис. 1,а). Визначення кривини теж відоме: $k = da/ds$. Звідси маємо: $da = k ds$. Із врахуванням виразу для k (3) можемо записати:

$$\alpha = \int k ds = -\frac{12P}{Eab^3} \int s ds = -\frac{6Ps^2}{Eab^3}. \tag{5}$$

Підстановка (5) у (4) дасть параметричні рівняння пружної осі тонкого стержня:

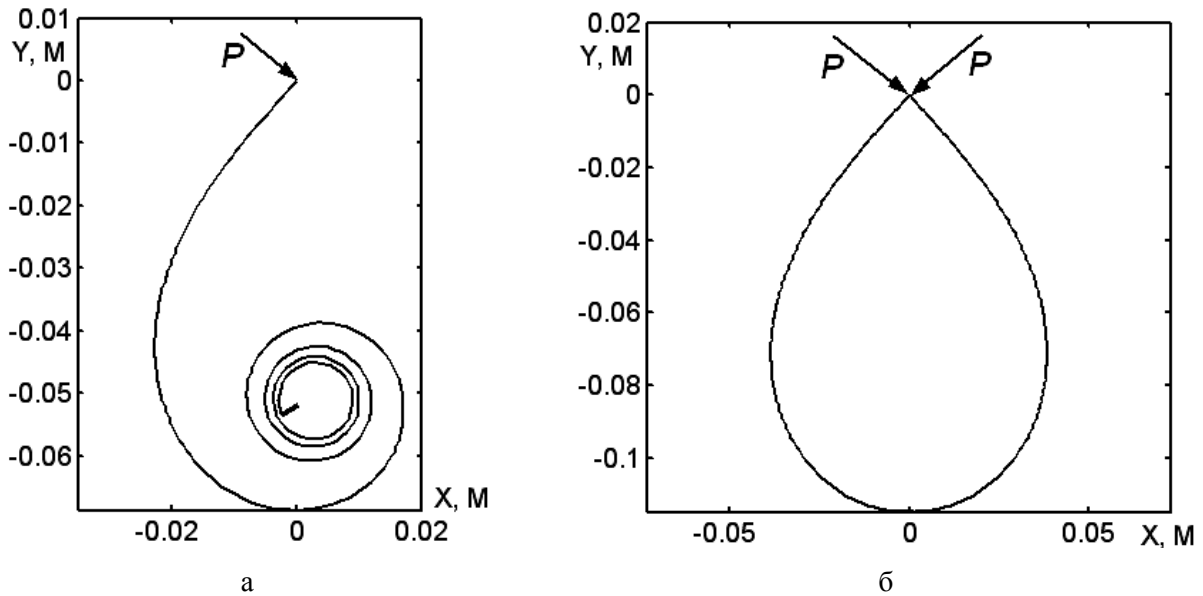
$$x = \int \cos\left(-\frac{6Ps^2}{Eab^3}\right) ds; \quad y = \int \sin\left(-\frac{6Ps^2}{Eab^3}\right) ds. \tag{6}$$

Вирази (6) проінтегрувати не вдається. Вони відомі в диференціальній геометрії як такі, що описують криву, яка носить назву клотоїди [5, стор. 84, формули (13)].

Чисельне інтегрування виразів (6) було застосовано для консольно закріпленої металевої лінійки довжиною $0,3$ м і поперечним перерізом $a = 18$ мм і $b = 0,3$ мм. При величині сили $P = 5$ Н, модулі Юнга $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па її пружна вісь приймає форму спіралі (клотоїди), тобто лінійка

перетворюється у спіральну пружину (рис. 2,а). Із рис. 2,а видно, що біля місця закріплення лінійки її кривина найбільша і її витки досить щільно розташовані один біля одного. Таким чином, при роботі пружини виникає тертя між сусідніми витками, що знижує її коефіцієнт корисної дії. Якщо ж її помістити у циліндричний барабан, то очевидно, що тертя зросте ще більше. Для зменшення сил тертя застосовують різні мастила [6].

Прикладання сили P з обох кінців лінійки можна розглядати, як дві симетричні консолі. При $P=1,8 \text{ Н}$ кінці лінійки сходяться і пружна лінія складається із двох симетричних частин клоатоїди (рис. 2,б). Після припинення дії сил лінійка повністю відновлює свою прямолінійну форму. Однак слід мати на увазі, що при тривалій дії зазначених сил можуть виникнути залишкові деформації, тобто в ненапруженому стані лінійка матиме початкову кривину.



**Рис. 2. Прогин металевої лінійки під дією зосередженої сили P :
а) лінійка закріплена у вигляді консолі; $P=5 \text{ Н}$, б) лінійка зігнута двома рівними силами $P=1,8 \text{ Н}$**

Аналізуючи форму пружної осі у вигляді спіралі (рис. 2,а), бачимо нерівномірність прилягання сусідніх витків між собою. Ближче до периферії відстань між ними різко зростає. Постає питання оптимізації форми пружини шляхом забезпечення рівномірного проміжку між витками. Такою кривою є евольвента кола, яка має наступне натуральне рівняння:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2rs}}, \quad (7)$$

де r – радіус початкового кола при відомому способі її побудови.

Вираз для кута α отримаємо інтегруванням виразу (7) згідно (5):

$$\alpha = \int \frac{ds}{\sqrt{2rs}} = \sqrt{\frac{2}{r}} s. \quad (8)$$

За формулами (4) знаходимо параметричні рівняння евольвенти кола підстановкою в них (8):

$$x = r \cos \sqrt{\frac{2s}{r}} + \sqrt{2rs} \sin \sqrt{\frac{2s}{r}}; \quad y = r \sin \sqrt{\frac{2s}{r}} - \sqrt{2rs} \cos \sqrt{\frac{2s}{r}}. \quad (9)$$

На рис. 3,а побудовано евольвенту кола за рівняннями (9) при $r=0,001 \text{ м}$ і довжині пружної осі $s=0,6 \text{ м}$. Відстань між сусідніми витками отриманої кривої приблизно дорівнює $2\pi r$, що дозволяє співставляти цю величину із товщиною b металевої смуги (рис. 1,б) і приймати необхідне

значення радіуса r . Для прийнятого радіуса ця відстань приблизно дорівнює 6 мм. За формулою (8) знаходимо значення кута α при зміні s від 0 до $0,6$: $\alpha=34,6$ рад. Звідси легко знайти число витків: $34,6/2\pi=5,5$.

Тепер залишилося взяти смугу такої форми, щоб її пружна вісь набула форми евольвенти кола. Очевидно, що ширина такої смуги (розмір a) має бути не постійною, а змінною і зменшуватися до периферії пружини. Щоб знайти вказану закономірність $a=a(s)$, прирівняємо вирази (3) і (7):

$$-\frac{12P}{Eab^3}s = \frac{1}{\sqrt{2rs}}, \quad \text{звідки} \quad a = -\frac{12Ps}{Eb^3}\sqrt{2rs}. \quad (10)$$

За залежністю $a=a(s)$, отриманою в (10), була отримана закономірність зміни ширини смуги в залежності від її довжини (рис. 3,б) при $P=5$ Н, $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $r=0,001$ м, $b=0,0005$ м, $s=0,6$ м. Як видно із рисунка, найбільша ширина $a \approx 0,04$ м смуги має бути в місці консольного кріплення її в центрі пружини. Закономірність зміни ширини смуги близька до лінійної.

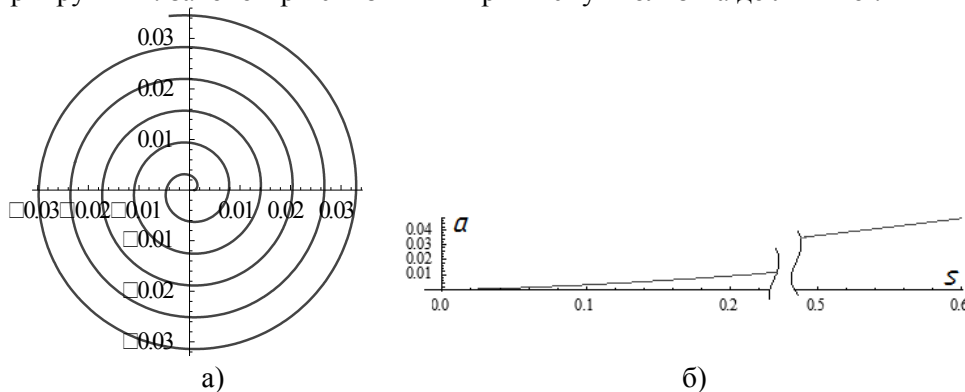


Рис. 3. До розрахунку ширини смуги для виготовлення спіральної пружини:
а) бажана форма пружної осі у вигляді евольвенти кола, б) закономірність зміни ширини смуги для забезпечення заданої форми.

Висновки. При значних прогинах стержнів у межах пружності для описання їх пружної осі не може бути застосована теорія лінійного згину. Для цього доцільно застосовувати натуральне рівняння – залежність кривини осі від дії прикладених моментів у функції довжини дуги цієї осі. Це дозволяє не тільки знаходити форму пружної осі, але за рахунок зміни поперечного перерізу стержня задавати потрібну форму осі. Такий підхід використано для знаходження змінної ширини смуги спіральної пружини з метою вдосконалення її форми і зменшення розмірів.

1. Сопротивление материалов // Под ред. акад. АН УССР Писаренко Г.С. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 775 с.
2. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е. П. Попов. – М.: Наука, 1986. - 286 с.
3. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. - 560 с.
4. Захаров Ю. В. Нелинейный изгиб тонких упругих стержней / Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин // Прикладная механика и техническая физика, 2002. - № 5. – С. 124 – 131.
5. Милинский В. И. Дифференциальная геометрия / В.И. Милинский. - Л.: КУБУЧ, 1934. - 332 с.
6. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. - В 3-х томах. – Т.3. – М.: Машиностроение, 1979. – 557 с.

Стаття надійшла в редакцію 15.03.2015.

УДК 621.755.65

В. Д. Рудь, І. В. Савюк, Л. М. Самчук, Ю. С. Повстяна*Луцький національний технічний університет***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ РІЗУЧОГО
ІНСТРУМЕНТА ТА ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ
ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ**

У роботі наведено результати досліджень для збільшення ефективності виробництва за рахунок вдосконалення виробничих процесів, з урахуванням сучасних досягнень в області машинобудування. У статті розглядається метод покращення обробленої поверхні за рахунок правильного вибору геометричних параметрів інструменту та режимів різання на прикладі токарної обробки.

Ключові слова: Критерій Стьюдента, архімедова спіраль, критерій Кохрана.

В.Д. Рудь, И.В. Савюк, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяная**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

В работе приведены результаты исследований для увеличения эффективности производства за счет совершенствования производственных процессов, с учетом современных достижений в области машиностроения. В статье рассматривается метод улучшения обработанной поверхности за счет правильного выбора геометрических параметров инструмента и режимов резания на примере токарной обработки.

Ключевые слова: Критерий Стьюдента, архимедова спираль, критерий Кохрана.

V. Rud', I. Saviuk, L. Samchuk, Y. Povstyana**EXPERIMENTAL STUDY OF GEOMETRY CUTTING TOOLS AND SPEED ON THE
TECHNOLOGICAL PARAMETERS TURNING**

The paper presents the results of research of increasing production efficiency by improving production processes, with current advances in engineering. The article deals with a method of improving the surface finish by proper selection of the geometrical parameters of the cutting tool and the example of turning.

Keywords: Student test, Archimedean spiral, Cochran criterion

Аналіз робіт спрямованих на поліпшення геометрії токарних прохідних різців, показав, що проблема правильного вибору кута заточки інструменту досі не вирішена. Тому досі актуальною є проблема вирішення цього завдання.

На даний час проведена велика кількість досліджень по визначенню оптимальної системи параметрів якості поверхонь деталей машин, яка б найбільше повно відображала їхні експлуатаційні властивості. У дослідженнях А. І. Ісаєва [1], А. Д. Макарова [2], Ю. Г. Проскурякова [4], П. І. Ящерицина [7], Ю. Г. Шнейдера [9] і ін. Виконаний аналіз численних факторів, які впливають на параметри поверхневого шару деталей машин, установлені взаємозв'язки між цими параметрами при різних методах обробки, виявлені шляхи керування якістю поверхні.

Мета роботи – підвищення якості поверхневого шару й ефективності обробки деталей за рахунок обґрунтованого вибору технологічних методів механообробки, а також розробка рекомендацій з вибору геометричних параметрів токарного різця.

Для того, щоб визначити кутові параметри різця необхідно його пов'язати з системою площин: 1. Основна площина проходить паралельно до напрямків поздовжньої і поперечної подач токарного верстата, як правило вона співпадає з опорною поверхнею різця. 2. Площина різання проходить через головну різальну кромку дотична до поверхні різання (перпендикулярно до основної площини) в стані спокою (без подачі). 3. Головна січна площина проходить через певну точку головної різальної кромки перпендикулярно до проекції головної різальної кромки на основну площину. 4. Допоміжна січна площина проходить через точку допоміжної різальної кромки перпендикулярно до проекції допоміжної різальної кромки на основну площину.

В головній січній площині розглядають такі кути, що характеризують процес різання: 1. Головний задній кут α – це кут між площиною різання і головною задньою поверхнею різця, заміряний в головній січній площині. 2. Кут загострення β – це кут між головною задньою і

передньою гранями, заміряний в головній січній площині. 3. Головний передній кут γ – це кут між передньою поверхнею і перпендикуляром до площини різання. 4. Кут різання δ – це кут між площиною різання і головною передньою поверхнею $\delta = \alpha + \beta = 90 - \gamma$. $\beta = 90 - \alpha - \gamma$ [5]. В допоміжній січній площині лежать допоміжний задній кут α_1 , допоміжний передній кут γ_1 , допоміжний кут загострення β_1 і допоміжний кут різання δ_1 .

Кут нахилу головної різальної кромки λ – це кут, що знаходиться в площині різання, що проходить через головну різальну кромку перпендикулярно до основної площини і лежить між різальною кромкою і лінією, що проходить через вершину різця паралельно до основної площини (рис 1). Цей кут впливає на напрям сходу стружки. При $\lambda +$ стружка іде в сторону обробленої поверхні, при $\lambda -$ в сторону необробленої поверхні, а при $\lambda = 0$ – завивається в архімедову спіраль [5].

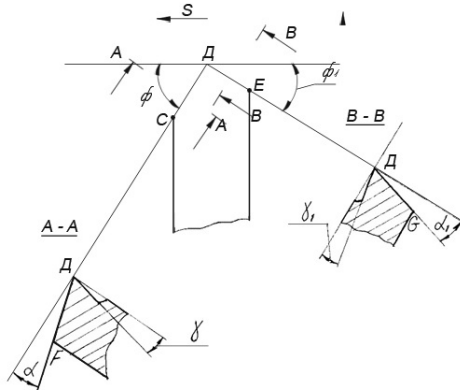


Рис. 1. Геометрія різця

Кут між проекцією головної різальної кромки на основну площину і напрямком подачі називається головним кутом в плані ϕ . Кут між проекцією допоміжної різальної кромки на основну площину і напрямком подачі називається допоміжним кутом в плані ϕ_1 . Кут між проекціями головної і допоміжної різальних кромки на основну площину називається кутом при вершині. Кут ϕ і ϕ_1 визначають положення різця по відношенню до заготовки.

Якість обробленої деталі визначається геометричною характеристикою поверхні, точністю виконаних розмірів і фізичною характеристикою поверхневого шару. Під геометричною характеристикою поверхні розуміють макрогеометію поверхні (еліпсність, вгнутість, конусність, випуклість, хвилястість) і мікрогеометрію – шорсткість обробки. Шорсткість оцінюється наступними основними параметрами: R_{\max} – максимальною висотою нерівностей; R_z – висотою нерівностей профілю по 10 точках; R_a – середньоарифметичним відхиленням профілю; R_g – середньоквадратичним відхиленням профілю; $S_{\text{ш}}$ – середнім кроком нерівностей профілю; l_v – відносною довжиною профілю; $r_{\text{ш}}$ – радіусом заокруглень впадин нерівностей.

Для оцінки шорсткості поверхні встановлено 14 класів (ГОСТ2789-73), для яких визначено основні значення R_a і R_z при певних базових довжинах. Ці 14 класів умовно поділяються на 4 групи: 1 група (1–3 класи) сюди належать грубі поверхні, які утворюються при чорновій обробці; 2 група (4–6 класи) належать поверхні утворені напівчистою обробкою різними різальними інструментами; 3 група (7–9 класи) становлять чистові поверхні, оброблені абразивним інструментом і чистовими методами (тонке точіння, розвертуванням, протягування) і електрофізичними методами; 4 група (10–14 класи) відносяться поверхні тонко оброблені доводочними інструментами (притиранням, хонінгуванням, суперфінішуванням...) [6].

Поверхня деталі, утворена в результаті механічної обробки, не може бути ідеальною гладкою. Будь який різальний інструмент залишає на ній сліди у вигляді виступаючих гребінців. Теоретичний профіль поверхні повинен складатися з однакових за формою гребінців. Фактично гребінці різні, що викликано пружною і пластичною деформаціями і іншими факторами. Шорсткість поверхні в процесі обробки утворюється в результаті дії багатьох факторів. Деякі з них визначають характер розміщення нерівностей та їх форму, інші – розміри.

При розрахунку висоти нерівностей не зважають на фактичні явища, що відбуваються в процесі утворення поверхневого шару деталі, а враховують лише швидкість різання V , значення подачі S та геометричні ріжучого інструменту, що приймають участь в утворенні нерівностей.

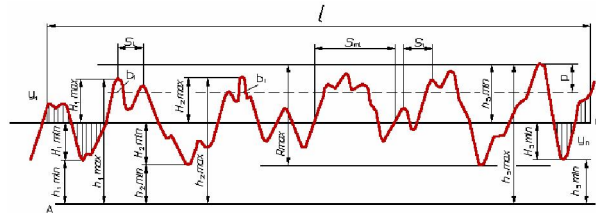


Рис.2. Реальна поверхня деталі

При проведенні експерименту досліджувалась шорсткість поверхні в залежності від зміни параметрів заточки інструменту та зміни режимів різання. Для зручності обчислення результатів використовувалась матриця повного факторного експерименту для двох факторів.

Таблиця 1. Матриця повного факторного експерименту для двох факторів

№п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂
1	-1	-1	Y ₁₁	Y ₂₁
2	-1	+1	Y ₁₂	Y ₂₂
3	+1	-1	Y ₁₃	Y ₂₃
4	+1	+1	Y ₁₄	Y ₂₄

Розглянемо модель залежності геометричних параметрів токарного різця та швидкості різання на шорсткість поверхні на прикладі токарної обробки. В якості змінного геометричного параметра обрано головний кут в плані X₁, другий змінний параметр – швидкість різання X₂. Модель процесу побудуємо при середніх значеннях факторів.

$$X_{01} = 50 \text{ град};$$

$$X_{02} = 100 \text{ м/хв.}$$

Подача S=0,2 мм/об; глибина різання t=1,5 мм.

1. Параметр оптимізації – шорсткість поверхні Ra.

2. Змінні фактори: X₁ – головний кут в плані; X₂ – швидкість різання.

На фактори X₁ і X₂ накладені обмеження

$$X_1 = 45 \dots 55 \text{ град}, X_2 = 80 \dots 120 \text{ м/хв}$$

Наведемо дані у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристика змінних параметрів.

Характеристика	X ₁ град	X ₂ м/хв
Основний рівень	50	100
Інтервал вріювання	5	20
Верхній рівень	55	120
Нижній рівень	45	80

Складається матриця планування і результати вимірювання шорсткості поверхні при двох паралельних дослідях Y₁, Y₂.

Таблиця 3. Отримані значення після проведення експерименту

№	Рівні		Натуральні значення факторів		Паралельні досліди		Середнє	Дисперсія
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂		
1	-1	-1	45	80	3,7	3,4	3,55	0,045
2	+1	-1	55	80	3,8	4,5	4,15	0,245
3	-1	+1	45	120	3,2	3,5	3,35	0,045
4	+1	+1	55	120	3,4	4,2	3,8	0,32

Перед тим як будувати математичну модель, необхідно перевірити відтворюваність дослідів, тобто переконатися, що одне і те ж поєднання рівнів факторів забезпечує отримання близьких результатів. Для цього кожне поєднання чинників проводять кілька разів. Ми провели два паралельні досліді, отримавши значення Y_1 і Y_2 . Для кожної серії паралельних дослідів обчислюють середнє арифметичне

$$Y_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n Y_{ji}, \quad (1)$$

де K – число паралельних дослідів;

Потім обчислюють і заносять в таблицю дисперсію кожної серії паралельних дослідів (незміщену оцінку):

$$S_i^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (Y_{ij} - \bar{Y})^2, \quad (2)$$

де i – номер серії паралельних дослідів.

$$S_1^2 = \frac{1}{2-1} [(3,7 - 3,55)^2 + (3,4 - 3,55)^2] = 0,045$$

$$S_2^2 = \frac{1}{2-1} [(3,8 - 4,15)^2 + (4,5 - 4,15)^2] = 0,245$$

$$S_3^2 = \frac{1}{2-1} [(3,2 - 3,35)^2 + (3,5 - 3,35)^2] = 0,045$$

$$S_4^2 = \frac{1}{2-1} [(3,4 - 3,8)^2 + (4,2 - 3,8)^2] = 0,32$$

Досліді вважаються відтворюваними, а оцінки дисперсії однорідними, якщо критерій Кохрана менше його допустимого табличного значення $G_{\text{табл.}}$.

$$G = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} < G_{\text{табл.}} \quad (3)$$

У таблиці [1] визначається значення $G_{\text{табл.}}$ з довірчою ймовірністю 0,95, при якій приймається гіпотеза про відтворюваність, залежно від числа ступенів вільності f при K паралельних дослідів

$$F = K - 1 \quad (4)$$

Розраховуємо значення G , використовуючи дані S_j^2 з матриці S_j^2 з матриці

$$G = \frac{0,32}{0,045 + 0,245 + 0,32 + 0,045} = 0,49$$

У таблиці (додаток 7 [1]) для $P = 0,95$, $N = 4$ і $f = 2-1=1$ знаходимо $G_{\text{табл.}}=0,907$. Оскільки $G < G_{\text{табл.}}$, то результати дослідів можна вважати відтворюваними.

5. Знаходимо коефіцієнти полінома для побудови математичної моделі процесу.

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2; \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j = \frac{1}{4} (3,55 + 4,15 + 3,35 + 3,8) = 3,7$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} y_j = \frac{1}{4} [(-1)3,55 + (+1)4,15 + (-1)3,35 + (+1)3,8] = 0,21$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{2j} y_j = \frac{1}{4} [(-1)3,55 + (-1)4,15 + (+1)3,35 + (+1)3,8] = -0,088$$

Таким чином, математичною моделлю процесу, що досліджується, є рівняння:

$$Y = 3,7 + 0,21X_1 - 0,088X_2.$$

Перевірка значущості коефіцієнтів визначається за допомогою критерію Стьюдента t_k (додаток 2 [6]) з умови

$$S_b t_k < |b_i|, \quad (5)$$

де S_b – похибка визначення коефіцієнтів

$$S_b = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (6)$$

де S_y^2 – оцінка дисперсії середнього значення \bar{y}

$$S_y^2 = \frac{1}{NK} \sum_{j=1}^N S_{yj}^2, \quad (7)$$

Тоді

$$S_b = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{K}}, \quad (8)$$

а вираз перевірки значущості із виразу прийме вигляд

$$t_k \cdot \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{K}} < |b_i|. \quad (9)$$

Величина t_k визначається з таблиці для $P=0,95$ і кількості ступенів вільності $f = N(K - 1)$

(10)

Для нашого прикладу $F = 4(2-1) = 4$, а із таблиці додатку для $f = 4$ $t_k = 2,78$
Величина помилки визначення коефіцієнтів рівняння регресії:

$$S_b = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{K}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{0,655}{2}} = 0,143.$$

Перевірка адекватності математичної моделі відповідає експериментальним даним. Отримавши рівняння процесу, перевіримо здатність досить точно описати процес, тобто ми визначимо, наскільки розрахункові значення параметра оптимізації y_i^p , близькі до дійсних значень, отриманих при проведенні експерименту.

Перевірка здійснюється за допомогою критерію Фішера F (додаток 3 [3]).

$$F = \frac{\max(S_{ad}^2 \cdot S_y^2)}{\min(S_{ad}^2 \cdot S_y^2)}, \quad (11)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^N (y_j^0 - y_j^p)^2, \quad (12)$$

B – число коефіцієнтів регресії, включаючи і вільний член;

Рівняння вважається адекватним, якщо:

$$F < F_{табл}, \quad (13)$$

Перевірка по критерію Фішера адекватності теоретичної моделі експериментальним даним показала, що отримана модель процесу задовольняє умові адекватності і може бути застосована для опису процесу:

$$Y = 3,7 + 0,21X_1 - 0,088X_2$$

В натуральних показниках

$$Ra = 3,7 + 0,21\varphi_1 - 0,088V$$

Аналогічно побудуємо модель процесу для умов: подача $S=0,3$ мм/об; глибина різання $t=1,5$ мм. Отримані результати вимірювання шорсткості поверхні при двох паралельних дослідах Y_1, Y_2 наведені в таблиці 4.

Таблиця 4. Отримані значення після проведення експерименту

№	Рівні		Натуральні значення факторів		Паралельні досліди		Середнє	Дисперсія
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1	Y_2	\bar{Y}	S
1	-1	-1	45	80	4,6	4,2	4,4	0,08
2	+1	-1	55	80	4,8	5,7	5,2	0,4
3	-1	+1	45	120	4,0	5,9	4,5	1,8
4	+1	+1	55	120	4,4	5,5	4,9	0,6

Перед тим як будувати математичну модель, необхідно перевірити відтворюваність дослідів, тобто переконатися, що одне і те ж поєднання рівнів факторів забезпечує отримання близьких результатів. Для цього, кожне поєднання чинників проводять кілька разів. Ми провели два паралельні досліди, отримавши значення Y_1 і Y_2 . Для кожної серії паралельних дослідів обчислюється середнє арифметичне

$$Y_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n Y_{ji}, \quad (15)$$

Наступним кроком є обчислення та занесення в таблицю дисперсії кожної серії паралельних дослідів:

$$S_i^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (Y_j - \bar{Y})^2, \quad (16)$$

де i – номер серії паралельних дослідів.

$$S_1^2 = \frac{1}{2-1} [(4,6 - 4,4)^2 + (4,2 - 4,4)^2] = 0,08$$

$$S_2^2 = \frac{1}{2-1} [(4,8 - 5,25)^2 + (5,7 - 5,25)^2] = 0,4$$

$$S_3^2 = \frac{1}{2-1} [(4,0 - 4,95)^2 + (4,95 - 5,9)^2] = 1,8$$

$$S_4^2 = \frac{1}{2-1} [(4,4 - 4,95)^2 + (4,95 - 5,5)^2] = 0,6$$

Досліди вважаються відтворюваними, а оцінки дисперсії однорідними, якщо критерій Кохрана менше його допустимого табличного значення $G_{\text{табл}}$.

$$G = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} < G_{\text{табл}}. \quad (17)$$

У таблиці [3] визначаємо значення $G_{\text{табл}}$ з ймовірністю 0,95, при якій приймається гіпотеза про відтворюваність, залежна від числа ступенів вільності f . Розраховуємо значення G , використовуючи дані S_j^2 з матриці.

$$G = \frac{1,8}{0,08 + 0,4 + 2,8 + 0,6} = 0,625.$$

У таблиці (додаток 7 [3]) для $P = 0,95$, $N = 4$ і $f = 2-1 = 1$ знаходимо $G_{\text{табл}} = 0,907$. Оскільки $G < G_{\text{табл}}$, то результати дослідів можна вважати відтворюваними. Знаходимо коефіцієнти полінома для побудови математичної моделі процесу.

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2; \quad (18)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j = \frac{1}{4} (4,4 + 5,25 + 4,95 + 4,95) = 4,89$$

Таким чином, виведене рівняння для математичної моделі

$$Y = 4,89 + 0,21X_1 - 0,0625X_2.$$

Перевірка коефіцієнтів визначається за допомогою критерію Стьюдента t_k (додаток 2 [3]) з умови

$$S_b t_k < |b_i|, \quad (19)$$

де S_b – похибка визначення коефіцієнтів

Отримавши рівняння процесу, визначимо, наскільки розрахункові значення параметра оптимізації Y_i^p , близькі до дійсних значень, отриманих при проведенні експерименту.

Перевірка здійснюється за допомогою критерію Фішера F (додаток 3 [3]).

$$F = \frac{\max(S_{ad}^2 \cdot S_y^2)}{\min(S_{ad}^2 \cdot S_y^2)}, \quad (20)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

Перевірка по критерію Фішера адекватності теоретичної моделі експериментальним даним показала, що отримана модель процесу задовольняє умові адекватності і може бути застосована для опису процесу:

$$Y = 4,89 + 0,21x_1 - 0,0625x_2$$

В натуральних показниках

$$Ra = 4,89 + 0,21\varphi_1 - 0,0625V$$

Висновок. Проведений аналіз існуючих методів підвищення якості поверхонь деталей. Доведена можливість досягнення мінімального впливу геометрії токарного різця та режимів різання на технологічні параметри токарної обробки. Таким чином, проаналізувавши вище сказане, стверджуємо про доцільність використання запропонованих режимів обробки та кутових параметрів токарного різця: кут в плані $\varphi_{\text{опт}}=45^\circ$, $n_{\text{opt}} = 315\text{об/хв}$; $s_{\text{opt}}= 0,3\text{мм/об}$; $v_{\text{opt}} = 120\text{м/хв}$.

1. Исаев А. И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке. - М.: Машиностроение, 1950.- 160 с.
2. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. - М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. «Машиностроение», 1975 г.
4. Проскураков Ю. Г. Технология упрочняющей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 203 с.
5. Мазур М. П. Основы теории резания материалов. Львів. Новий Світ, 2000.
6. Панов А. А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога А. А. Панов. – М.: Машиностроение, 1988. – 736 с.
7. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства.-Л.: Машиностроение, 1972. - 210 с.
8. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи обробки деталей» . / Вінниця ВНТУ – 2011.
9. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975 – 222 с.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2015.

УДК 316.776:330.341.1

Н. Рудь, С. Кушнірук, О. Марчук
ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ

В статті на основі аналізу існуючих дефініцій інформації запропоновано авторське визначення поняття «інформація». Виділено три функції інформаційного забезпечення. Рекомендовано основні джерела інформації для будь-якого підприємства. Значна увага надається інформаційній взаємодії. Обґрунтовано необхідність використання соціальних мереж для об'єднання пластів інформації, згрупування наукового потенціалу, рекламування і освоєння нових розробок. Виконано короткий огляд соціальних мереж з точки зору їх можливостей забезпечення необхідною інформацією.

Ключові слова: інформація, наука, інноваційна діяльність, взаємодія, соціальні мережі.

Табл. 1. Рис. 6. Літ. 7.

Н. Рудь, С. Кушнірук, О. Марчук
ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

В статье на основе анализа существующих дефиниций информации предложено авторское определение понятия «информация». Выделено три функции информационного обеспечения. Рекомендованы основные источники информации для любого предприятия. Значительное внимание уделено информационному взаимодействию. Обосновано необходимость использования социальных сетей для объединения пластов информации, группирования научного потенциала, рекламирования и освоения новых разработок. Выполнено короткий обзор социальных сетей с точки зрения их возможностей обеспечения необходимой информацией.

Ключевые слова: информация, наука, инновационная деятельность, взаимодействие, социальные сети.

N. Rud, S. Kushniruk, O. Marchuk
INFORMATION SUPPORT OF INNOVATIVE DEVELOPMENT

Today in Ukraine acute problem of developing its own model of restructuring the economy, which should be based on the principles of innovation type of society that involves the shift of scientific and technological solutions for the use of innovative advanced technologies, the transition to high-tech products. This can be achieved only under conditions of operation clearly established information system in general and the system of science and innovation information in particular.

The article is based on an analysis of existing data definitions proposed copyright definition of "information." Three functions of information security. Recommended main source of information for any company. Much attention is paid to information interaction. The necessity of using social networks to combine layers of information grouping scientific potential, and promote the development of new materials. Made a brief overview of social networks in terms of their capacity to ensure the necessary information.

Keywords: information science, innovation, interaction, social networks.

Актуальність проблеми: Проблема доступу до інформації особливо гостро відчувається у сфері науково-інноваційної діяльності, так як вона здійснюється на передових напрямках науки і техніки. Відсутня інформаційна культура та інфраструктура, здатна на сучасному рівні забезпечити отримання, обробку, зберігання, передачу та оновлення інформації. Спостерігається відсталість інформаційних технологій в науково-інноваційній сфері України. На сьогоднішній день жодна соціально-економічна система не здатна функціонувати при відсутності потужного інформаційного фундаменту. В умовах постіндустріального суспільства на перше місце виходять проблеми інформаційного забезпечення. Без використання інформаційних технологій, аналізу інформації не приймається жодне управлінське рішення.

Характерною особливістю сучасного життя є постійно зростаючі обсяги інформаційних потоків і масивів. Також, актуальність даної теми полягає в тому, що в умовах інформаційної війни, яку сьогодні веде Україна з Росією, дуже важливим є саме збереження і захист власної інформації, інформаційного простору.

Аналіз останніх досліджень. Питання розвитку інформаційних ресурсів для інформаційно-аналітичного забезпечення науково-технологічної та інноваційної діяльності висвітлені в роботах вітчизняних науковців Г.В. Калитича, В.Д. Пархоменка, О.В. Пархоменка, В.І. Воронкова, С.І. Горбаня, С.Г. Лобанова, О.І. Чернова та ін. Цьому питанню присвячені дослідження російських науковців Ю.М. Арського, Л.Ф. Борисова, Ж.Ж. Васильєвої, Д.Б. Саркіяна, С.М. Селеткова, В.А. Цветкова, С.П. Яшукова та ін.

Мета дослідження – показати роль інформації та розробити пропозиції щодо використання соціальних мереж для інформаційного забезпечення інноваційного розвитку країни.

Виклад основного матеріалу: В країні існує безліч локальних інформаційних мереж, баз даних, телекомунікаційних структур, створених суб'єктами різних сфер діяльності: державними органами, фінансовими структурами, промисловими підприємствами, навчальними та науковими закладами тощо. В основному дані мережі застосовуються для внутрішнього користування, хоча інформація, якою вони володіють, необхідна і поза межами системи. Часто локальні мережі сформовано на різних організаційних та технічних принципах, що робить неможливою їх інтеграцію. В результаті цього інформація втрачає практично всі необхідні якості: оперативність, доступність отримання, можливість швидкої обробки та передачі, повноту охоплення проблеми і ряд інших суттєвих характеристик, які визначають корисність інформації [1].

Інформація— це нові відомості, які прийняті, зрозумілі і оцінені її користувачем як корисні. Іншими словами, інформація— це нові знання, які отримує споживач (суб'єкт) у результаті сприйняття і переробки певних відомостей.

У залежності від галузі використання термін «інформація» одержав ряд визначень, зокрема[2]:

– це відображення заміни дискретного значення енергетичного процесу в контурі керування пристрою керування іншим дискретним значенням, зокрема — тим самим (В. П. Камша);

– комунікація та зв'язок, в процесі якого усувається невизначеність (інформаційна ентропія) (теорія зв'язку, американський вчений Клод Шеннон);

– міра неоднорідності розподілу матерії та енергії у просторі та у часі, міра змін, якими супроводжуються всі процеси, що протікають у світі (український вчений В.М. Глушков);

– позначення змісту, отриманого із зовнішнього світу в процесі нашого пристосування до нього і пристосування до нього наших почуттів (американський вчений Норберт Вінер);

– заперечення ентропії, міра хаосу в системі (термодинаміка, французький вчений Леон Бріллюен);

– передача різноманітності (англійській філософ Вільям РоссЕшбі);

– міра складності структур (французький вчений Абраам Моль);

– ймовірність вибору (радянські вчені Аківа та ІсаакЯглом);

– відображена різноманітність (радянський вчений А. Д.Урсул);

– фундаментальний генералізаційно-єдинийбезпочатково

нескінченнийзаконопроцесавтоосциляційного, резонансно-сотового, частотно-квантового та хвильового відношення, взаємодії, взаємоперетворення та взаємозбереження (у просторі та часі) енергії, руху, маси та антимаси на основі матеріалізації та дематеріалізації в мікро- та макроструктурах Всесвіту(інформаціологія, російський вчений І. Й.Юзвішин);

– результат інтелектуальної (аналітико-синтетичної чи евристичної) діяльності певної людини щодо подання відомостей, повідомлень, сигналів, кодів, образів тощо (В. С. Цимбалюк).

Тому, доцільним буде розглянути авторське трактування поняття інформації. Інформація – це сукупність повідомлень, сигналів, відомостей, даних, які можуть бути створені в результаті цілеспрямованої, розумової діяльності людини, є результатом роботи машин, можуть виникати випадково і формуються в процесах збирання, обробки, обміну та аналізу.

Провідною ланкою ринкової економіки є інформованість керівного й адміністративно-управлінського апарату, створення інформаційного сервісу для осіб, які приймають рішення, збільшення інтелектуального продукту, виробленого суспільством. Інформація є продуктом творчих сил людства. Вміле використання її сприяє науково-технічному прогресу.

Інформаційна сфера діяльності людини давно стала визначальним фактором розвитку економіки, техніки, науки. За даними ЮНЕСКО, більше половини зайнятого населення розвинених країн бере особисту участь у процесах виробництва і поширення інформації (у США – 56% загальної кількості працюючих), до половини національного продукту цих країн пов'язано з інформаційною діяльністю суспільства.

Інформація такий самий принциповий фактор розвитку як сировина й енергія.Ресурси інформації використовуються безперервно для зв'язку і координації кожної фази процесу перетворення. Інформаційні ресурси є продуктом інтелектуальної діяльності найбільш кваліфікованої і творчої активної частини працездатного населення. Достатність, своєчасність й достовірність інформації відіграють особливе значення. Інформаційне неучтвo призводить до банкрутства.

У механізмах реалізації інноваційної політики держави інформаційне забезпечення відіграє надзвичайно важливу, а інколи й вирішальну роль. Можна виділити три основні функції такого забезпечення, кожна з яких потребує своїх специфічних, притаманних їй обсягів і змісту

інформації, відрізняється перевагою різних джерел та напрямів її потоків. Перша з них полягає у реалізації зворотного зв'язку між суб'єктами та об'єктами науково-інноваційної політики, друга – у задоволенні потреб вчених та інженерів, тобто забезпеченні процесу наукового пошуку. В останні роки все більшого значення набуває також третя функція – забезпечення інформацією маркетингу інновацій, починаючи від попиту на дослідження і розробки та закінчуючи вивченням ринку нових технологій і товарів.

Інформаційні потоки, необхідні для реалізації кожної з названих функцій, часом частково перекриваються, доповнюючи один одного, проте така їх класифікація дозволяє, на наш погляд, більш глибоко проаналізувати ситуацію, чіткіше окреслити проблеми, що потребують свого вирішення у цій галузі.

Якщо говорити про зворотній зв'язок між суб'єктами та об'єктами науково-інноваційної політики, тобто про забезпечення органів державного управління інформацією про реальні результати проведення такої політики, то зрозуміло, що найбільш поширеним і доступним джерелом необхідних даних є державна статистика. І корінні питання тут: з одного боку достовірність цих даних, а з іншого – оптимальність їх змісту та структури з точки зору можливого аналізу.

Якісно новим етапом в організації та використанні науково-інноваційної інформації є перехід до нових комп'ютерних технологій, що вже сьогодні помітно позначився на інформаційному забезпеченні науковців. Змінюється методологія інформаційної діяльності, значно прискорився процес інформаційного обміну, розширюються можливості користувачів інформаційними ресурсами. Найбільш значні перспективи в цьому плані пов'язані з використанням Інтернету, який відкриває широкий доступ до інформаційного простору [3]. Обсяг економічної інформації зростає у квадратичній залежності від збільшення числа підприємств і кількості виробленої продукції.

При дослідженні інформаційного забезпечення інновацій, слід чітко виявити джерела та канали передачі інформації.

Основні групи джерел та каналів інформації:

- 1) загальні публікації + спеціальні публікації і банки даних (канал „Текст”);
- 2) клієнти + постачальники + банкіри + дилери і агенти (канал „Фірма”);
- 3) громадські служби + консультанти + адміністрація (канал „Консультант”);
- 4) ярмарки, салони, конференції (канал „Бесіда”).

По каналу „Текст” фірма отримує 30–40% інформації. Канал „Фірма” з'являється в результаті контактів персоналу фірми зі всіма партнерами – це ще 30–40% інформації. Канал „Консультант” забезпечує приблизно 10–15% інформації. Через канал „Бесіда” проходить 5–6% інформації. Крім того, інформація може бути отримана фірмою випадково (канал „Джокер”) [3].

Для того, щоб зрозуміти зв'язки, які виникають між учасниками інформаційних процесів під час отримання та передачі інформації, доцільно розглянути модель взаємодії складових інформаційного забезпечення інноваційної діяльності (рис. 1).

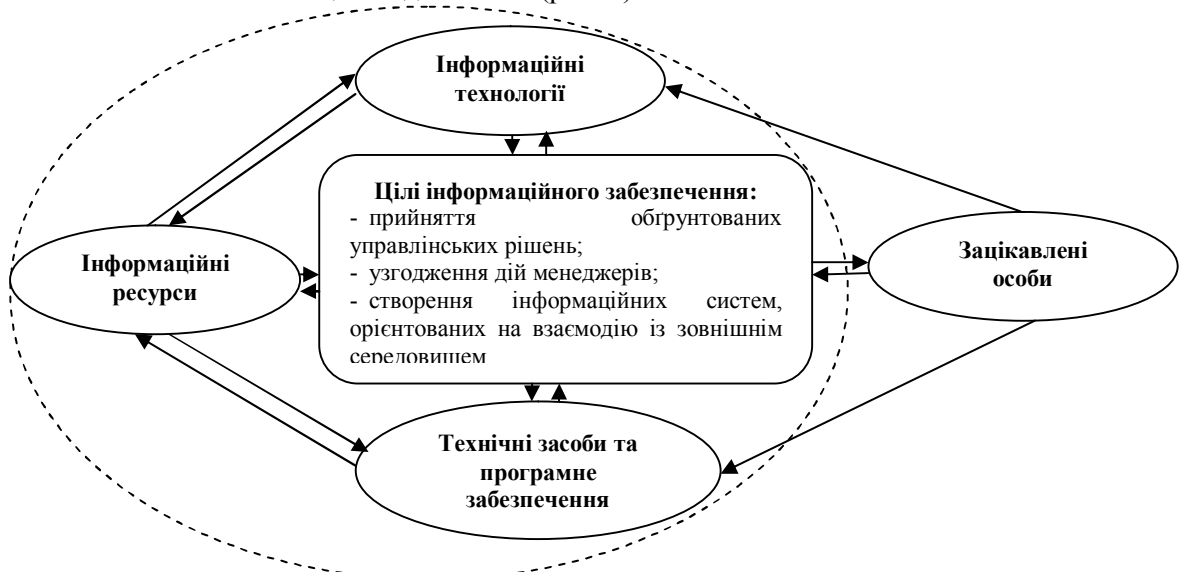


Рис. 1. Складові та цілі інформаційного забезпечення

Згідно рис. 1 всі складові умовно можна розділити і віднести до двох середовищ: зовнішнього, яке представлено безпосередньо зацікавленими сторонами, і внутрішнього, що включає інформаційні технології, інформаційні ресурси та технічні засоби й програмне забезпечення.

Слід зазначити, що інформаційний процес не здійснюється просто так, завжди інформація не хаотично переміщується з місця на місце, а її шукають, обробляють, отримують та аналізують зацікавлені сторони. Кожна із них переслідує під час цього свої цілі, але слід відмітити, що учасників, які безпосередньо займаються інформацією, є досить багато (табл. 1).

Як уже зазначалося раніше, в інформаційному забезпеченні інноваційного розвитку є достатня кількість джерел та каналів передачі інформації. Безліч суб'єктів за їх допомогою здійснюють свою діяльність, але якщо розглядати інформаційне забезпечення на конкретному підприємстві, або взагалі в бізнесі, то усіх учасників можна умовно поділити на дві групи: юридичні та фізичні особи. Зв'язки в інформаційному забезпеченні інноваційної діяльності представлені в табл. 1. [4].

Таблиця 1. Зацікавлені сторони в результатах інформаційного забезпечення інноваційної діяльності підприємства

Зацікавлені сторони		
Перелік	Внесок	Очікування
Керівництво на всіх рівнях управління	Новітні знання; ідеї; досвід роботи; вміння; компетентність; відданість підприємству	Забезпечення інноваційного розвитку підприємства; активізація інноваційної діяльності підприємства
Інвестори (акціонери)	Капітал; напрями вдосконалення інноваційної діяльності підприємства	Стабільні дивіденди
Інвестори (кредитори)	Позиковий капітал; умови кредитування	Відсотки за кредит; своєчасне повернення кредиту
Персонал	Знання; ідеї; досвід роботи; кваліфікація; професійна підготовка; права інтелектуальної власності; відданість підприємству	Високий рівень оплати праці; умови праці; забезпечення соціального пакету; підвищення кваліфікації за новітніми технологіями
Клієнти	Лояльність до підприємства	Широкий асортимент високоякісної інноваційної продукції, інноваційних технологій; умови продажу та оплати; система знижок; доброзичливе ставлення; рівень післяпродажного обслуговування
Постачальники та підрядники	Необхідні активи; нові технологічні процеси; прогресивні процесові інновації; своєчасне виконання замовлень; гнучкі ціни; умови закупок і оплати	Повна і своєчасна оплата поставок; довгострокові контракти
Державні органи	Підтримка інноваційної діяльності; надання пільг і дотацій; правове поле діяльності	Податки, внески і збори; наповнення державного і місцевого бюджетів; використання природоохоронних технологій; створення робочих місць
Суспільство	Імідж у засобах масової інформації; висококваліфіковані місцеві фахівці; гранти на розвиток інноваційної діяльності	Робочі місця для місцевих жителів; економічний і соціальний розвиток регіону; інвестиції в місцеву інфраструктуру, меценатство; благочинні заходи; охорона навколишнього середовища

Відмітимо, що досить вагоме місце, в інформаційному забезпеченні посідають «інформаційні технології». Інформаційна технологія – процес, що використовує сукупність засобів і методів збору, отримання, накопичення, зберігання, обробки, аналізу і передачі даних (первинної інформації) в організаційній структурі з використанням засобів обчислювальної техніки для отримання інформації нової якості про стан об'єкта, процесу або явища (інформаційного продукту) (рис. 2).

Метою інформаційної технології є виробництво інформації, її аналіз та прийняття рішення для виконання певної дії.

Якщо застосовувати різні технології до одного матеріального ресурсу, можна отримати різні вироби, продукти. Це буде справедливим і для технології переробки інформації.

Джерело інформації (пропозиція)														
Бібліотеки	Науково-технічні центри	Інтернет	ОДПА (консультації)	Консалтингові інформаційні центри	Технопарки, бізнес інкубатори	Центри зайнятості	ВНЗ, (центри комерціалізації)	Статистика	Виставки, ярмарки, форуми	Фізичні особи	Телепередачі (економічні новини)	Бази даних		
Засоби передачі інформації														
Інтернет	Телефонний зв'язок	Пошта	Кур'єрські служби	Спілкування	Телебачення	Періодична преса								
Споживачі інформації (попит)														
Юридичні особи				Підприємства різних галузей економіки: енергетики, транспорту, автомобілебудування, хімічної і т.д.										
Фізичні особи				При створенні нових підприємств (малого та середнього бізнесу)										

Рис. 2. Потoki між учасниками інформаційного процесу

Слід зауважити, що всі інформаційні технології в процесі свого існування пройшли п'ять основних етапів:

1 етап (до другої половини XIX ст.). «Ручна» інформаційна технологія, інструментарій якої склали: перо, чорнильниця, книга. Комунікації здійснювалися в ручний спосіб або через пошту листів, пакетів, депеш. Основною метою було представлення інформації в потрібній формі.

2 етап (з кінця XIX ст.). «Механічна» технологія, інструментарій якої склали: пишуча машинка, телефон, диктофон та пошта, що оснащена більш довершеними засобами доставки. Основною метою було представлення інформації в потрібній формі більш зручними засобами.

3 етап (40–60 рр. XX ст.). «Електрична» технологія, інструментарій якої склали: великі ЕОМ і відповідне програмне забезпечення, електричні пишучі машинки, ксерокси, портативні диктофони. Акценти в інформаційній технології починають зміщатися з форми представлення інформації на формування її змісту.

4 етап (з початку 70-х рр.). «Електронна» технологія, основним інструментарієм якої стають великі ЕОМ та інформаційно-обчислювальні системи, оснащені широким спектром базових і спеціалізованих програмних комплексів. Центр технології зміщується на формування змістовної сторони інформації для управлінського середовища різних сфер суспільного життя.

5 етап (з середини 80-х рр.). «Комп'ютерна» («нова») технологія, основним інструментарієм якої є персональний комп'ютер з широким спектром стандартних програмних продуктів різного призначення. На цьому етапі відбувається процес персоналізації обчислювальних систем і широке використання телекомунікації. У зв'язку з переходом на мікропроцесорну базу істотних змін зазнають і технічні засоби побутового, культурного та іншого призначень. Починають широко використовуватися в різних областях глобальні і локальні комп'ютерні мережі.

В цілому нами розглянуті технології через те, що подальші інформаційні мережі та системи базуються на все новіших технологіях. Наприклад, в процесі людського існування звичайне

ведення повідомлень на печерах перетворилося на спілкування в соціальних мережах. Саме це і є тією інформаційною технологією, яка в майбутньому буде розвиватися та удосконалюватися [5].

Інформаційна взаємодія – це постійний обмін інформацією про різні явища і процеси діяльності для того, щоб успішно керувати численними об'єктами навколишнього світу, неодмінна умова функціонування й розвитку будь-якої економічної системи.

Інформація є специфічною формою взаємозв'язку, взаємодії компонентів системи, а також системи в цілому з навколишніми умовами. Вона обслуговує всі функції управління – від підготовки виробництва до кінцевого результату – реалізації матеріальних благ та отримання бажаних прибутків. Інформація містить відомості про методи і засоби управління технологічними процесами, які потрібно використовувати для досягнення ефективного господарювання, досягнення поставлених цілей.

З метою швидкого доведення інформації до широкого кола споживачів використовують сучасні електронні машини, які доносять інформаційний документ від першоджерел у необхідній кількості, якості та часі.

Широке використання науково-технологічної інформації – обов'язковий елемент професійної діяльності спеціаліста. Тому формування і розвиток навичок інформаційної роботи стає важливим компонентом освіти, покликаним збільшити рівень професійної підготовки майбутнього спеціаліста.

Оскільки прийняття будь-якого управлінського рішення спирається на певний інформаційний базис, то значення інформаційного забезпечення НДДКР важко переоцінити. По суті, будь-які рішення з НДДКР спрямовані у майбутнє (і часто досить віддалене), перевірка правильності рішень здійснюється через значний проміжок часу, рівень невизначеності наявної інформації досить значний. Таким чином, можна стверджувати, що управління НДДКР – це управління за слабкими сигналами, управління за прогнозною інформацією.

Стратегія управління фірмою повинна постійно вбирати в себе нові дані з економічної системи про зміни в суспільстві і політиці та не тільки у власній державі, але й на світовому рівні.

Достовірна інформація для підприємця існує лише в тому випадку, якщо попередньо існує намір (задумка), мета, проект. Намір визначає відношення до аналізу оточуючої дійсності, що в свою чергу відображається у прояві уваги, котра і дозволяє виділити потрібну інформацію з загального шумового інформаційного фону.

В НДДКР насамперед приймається стратегічне рішення – визначається напрямок робіт. Прийняття цього рішення (намір) визначає потребу в конкретній інформаційній базі. Надалі приймаються тактичні рішення щодо вибору найкращого шляху досягнення мети (і цим визначається потреба у відповідній інформаційній базі), а потім щоденно приймаються оперативні рішення конкретних питань НДДКР (це потребує своєї інформаційної бази).

Таким чином, роль інформації в інноваційній діяльності базується на принципі нерозривності тріади: мета – потреби – бази (що на заході прийнято називати принципом 3В – від французького *but*s–*besoins*–*bases*).

Стратегічне рішення з НДДКР прямо впливає на їх долю і життєздатність. Через зростання нестабільності на світовому ринку кількість наукових розробок постійно зростає, їх наслідки все важче спрогнозувати, зростає ціна помилки. Все це визначає важливість стратегічної інформації. По методу 3В слід визначати стратегічні цілі, потім стратегічні потреби (ці два етапи відповідають стратегічному аналізу) і на завершення перейти до стратегічних інформаційних баз.

Тактична мета полягає у виборі найкращого засобу досягнення стратегічної мети і в контролі незмінності умов, які визначили цей вибір. Відповідно виникають двоякі потреби: характеристики напрямків діяльності і матеріалів знавколишнього середовища. Ці потреби настільки різні, що потребують інформаційних баз двох видів – „по запити” і „моніторинг” [3].

В рамках даного питання найбільш доцільним буде розглянути самі нові, інноваційні продукти та моделі, які вплинули не лише на розвиток інновацій, а на розвиток цілого світу і задали напрямок інформаційним інноваціям. Спершу розглянемо систему «Базис»

Створення динамічної інформаційної мережі (ДІМ) «Базис» і використання її в інноваційних процесах стало нагальною проблемою сьогодення. Створити дієву структуру для організації та стимулювання інноваційних процесів не так просто. Існуючі організації недостатньо відомі, виконують лише якусь обмежену функцію. Наприклад, УФАМТ – всеукраїнська громадська організація, заснована в 1991 році, створена вперше в світовій практиці з метою активізації індивідуального інтелекту та сприяння використанню творчого потенціалу людини. Інформаційно-аналітичний центр «ЛІГА», заснований в 1991 році, спеціалізується у галузі створення

інформаційних ресурсів правової і ділової інформації, розробці сучасних способів доступу до інформаційних баз даних, розробці інформаційних систем прийняття рішень. Існує безліч інших сайтів, технічних форумів, блогів. Але інформація і науковий потенціал роздроблені, тому немає достатньої бази для НДДКР, висвітлення нових наукових теорій, винаходів, патентів.

Дані проблеми можна вирішити за допомогою використання в «Базисі» соціальної мережі. Соціальні мережі останніми роками стали головним інструментом зі встановлення зв'язків через свій широкий масштаб і здатність залучати мільйони людей на глобальному рівні. Мережа дасть змогу об'єднати пласти інформації, згрупувати науковий потенціал, рекламувати і освоювати нові розробки.

Для кращої організації і збільшення функціональності до соціальної мережі необхідно додати ресурсне ядро. Прототипом Ядра є Вікіпедія. Головна ідея Вікіпедії – кожна особа має вільний доступ до обсягу людських знань. Тобто, у вільній енциклопедії кожен може без обмежень копіювати, поширювати та змінювати інформацію. Важливо розуміти, що Вікіпедія – це не підручник чи архів, і не Youtube, тому що вона дає базову інформацію, не заглиблюється у контекст. Однак ядро має суттєві відмінності, пов'язані з чіткою направленістю і науковою глибиною інформації.

При детальному розгляді соціальної частини «Базису» слід зазначити основоположні принципи: двоконтурність, мережа в мережі, часткова відокремленість. Двоконтурність передбачає створення власної соціальної мережі (перший контур) та використання вже існуючих соціальних мереж (другий контур) в основному за рахунок використання вже існуючих інструментів «Мої групи» і «Додатки», але з обмеженою функціональністю, враховуючи віддаленість і можливі проблеми у роботі мережі. За рахунок цього буде досягатися поступовий перехід з другого контуру в перший. (Так як в Мейлру, де є таке поняття як мій світ «Мейлру» та загальна сторінка, з поштою, пошуковим браузером...). Цей принцип двоконтурності, а також структуру системи «Базис» розглянемо на рис. 3.

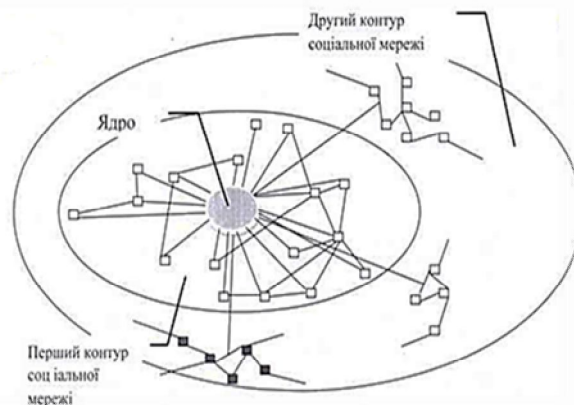


Рис. 3. Структура моделі «Базис»

Мережа в мережі передбачає об'єднання в глобальну мережу Інтернет. Адже Internet – найбільша глобальна комп'ютерна мережа, що зв'яже десятки мільйонів абонентів у більш як 150 країнах світу. Щомісяця її поширеність зростає на 7–10%. Інтернет утворює ніби ядро, яке забезпечує взаємодію інформаційних мереж, що належать різним установам у всьому світі. Таким чином, Internet можна розглядати як деякий глобальний інформаційний простір. Водночас – це несистематизований набір поєднаних і взаємопов'язаних комерційними каналами зв'язку сотень мільйонів серверів, як правило, великої потужності, що належать юридичним і фізичним особам.

Обсяги інформації в цій мережі постійно нагромаджуються, Internet також стрімко поширює свої межі. Структура інформації в мережі невпорядкована, тому що вона занадто різна за природою та походженням. Проте формується вона на серверах за єдиними методиками і в рамках сервера структурована. У зв'язку з цим доступ до інформації ускладнений. Тобто, щоб обмежити інформаційний простір, відкинувши інформаційне сміття, використовується принцип часткової відокремленості, що полягає у формуванні соціальної мережі як бар'єрного буфера інформації з глобальної мережі. Основними інструментами виступають опитування користувачів і статистика популярності тієї чи іншої інформації.

Переваги соціальної мережі в організації комунікації досить значні, але ми виділимо основні:

- 1) самоорганізація (об'єднання за інтересами, професійною діяльністю, місцем роботи чи навчання, родинними зв'язками);
- 2) саморозвиток (користувачі вказують шлях розвитку);
- 3) саморозширення (збільшення кількості учасників за рахунок самореклами);
- 4) самореклама (користувач буде свідомо чи несвідомо рекламувати);
- 5) встановлення соціального капіталу (користувач використовує власні кошти на соціальних рахунках).

Форма соціальної мережі допомагає визначити ступінь своєї корисності для її учасників. Менші, більше зв'язані мережі, можуть бути менш корисними для своїх учасників, ніж мережі з багатьма слабкими зв'язками з особами ззовні від основної мережі. Більш «відкриті» мережі багатьма слабкими зв'язками та соціальними відносинами вірогідніше будуть пропонувати нові ідеї та можливості для своїх учасників, ніж закриті мережі з багатьма надлишковими зв'язками. Інакше кажучи, група знайомих друзів, які спілкуються лише один з одним вже володіють спільними знаннями та можливостями. Група осіб із зв'язками з іншими соціальними мережами, вірогідно, отримуватимуть доступ до ширшого діапазону інформації. Для досягнення успіху індивідам краще мати зв'язки з декількома мережами, чим багато зв'язків в межах однієї мережі. Аналогічно, індивіди можуть впливати або діяти в ролі брокера в середині своїх соціальних мереж, з'єднуючи дві мережі, в яких відсутні безпосередні зв'язки, що відоме як заповнення соціальних дір. На рис.4 наведено приклад відображення схеми зв'язків в соціальних мережах.

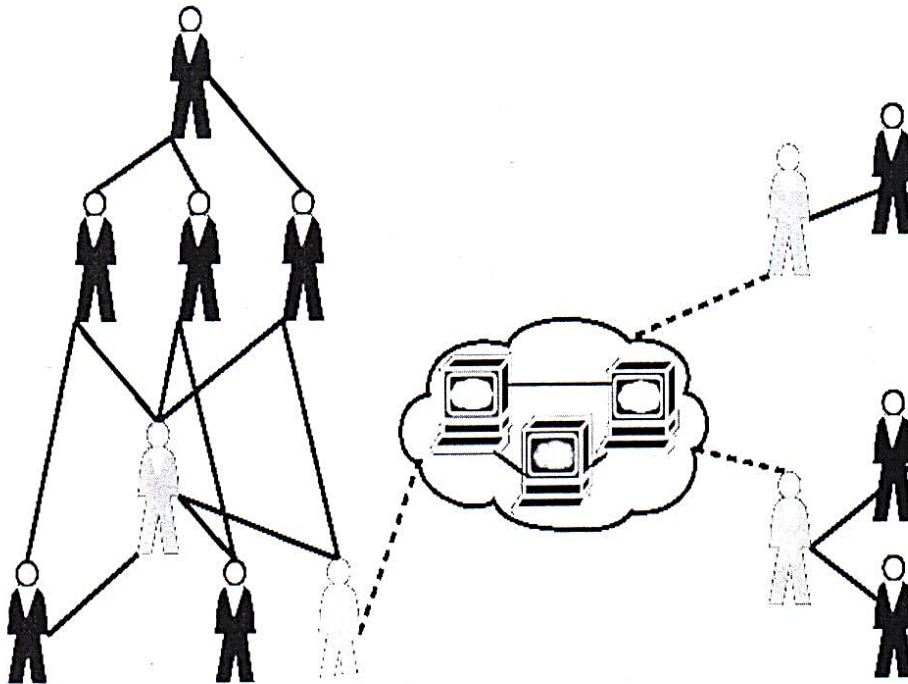


Рис. 4. Зв'язки в соціальних мережах

В соціальній мережі зліва, індивід, позначений світлим кольором, має найбільше зв'язків в середині своєї соціальної мережі. В ідеальній ситуації, він мав би бути лідером чи керівником групи або організації. Індивіди, позначені темним кольором, мають зв'язки із іншими соціальними мережами і можуть виступати в ролі посередників інформації між мережами.

В соціальних мережах можливе використання нових видів організації учасників. Перехід від ієрархічної структури до структур без керівного ядра.

Першість у соціальних мережах грає важливу роль, але має велике значення і направленість на певну групу користувачів за мовними чи іншими параметрами. В нашому випадку соціальна частина «Базису» направлена на пошук і реалізацію інтелекту залучення «мізків» і «грошей», забезпечення інноваційного процесу за рахунок об'єднання ресурсів користувачів. При цьому прошарок таких потенційних користувачів досі необ'єднаний.

«Базис» динамічний, тобто змінюється, еволюціонує з часом. З ростом інформаційних потоків будуть пришвидшуватись і видозмінюватись способи їх обробки. Саме ядро обробляє, систематизує, формує базу даних, яка є одним із ресурсів ядра. Необхідно враховувати основні властивості інформації такі як: цінність, достовірність, актуальність. Як правило, достовірною вважається насамперед інформація, яка несе у собі безпомилкові та істинні дані. Під безпомилковістю слід розуміти дані, які не мають прихованих або випадкових помилок. Випадкові помилки у даних обумовлені, як правило, неумисними спотвореннями змісту людиною чи збоями технічних засобів при переробці даних в інформаційній системі. Під істинними слід розуміти дані, зміст яких неможливо оскаржити або заперечити. Актуальність — здатність інформації відповідати вимогам сьогодення (поточного часу або певного часового періоду).

Враховуючи дані потреби, для обробки і зберігання інформації використовують інформаційні системи (ІС). В базисі планується сформувати сукупність інформаційних систем (СІС), організовану за єдиними принципами і на єдиній базі, що включає в себе: технічні засоби обробки даних, програмне забезпечення і відповідний персонал. Чотири складові частини утворюють внутрішню інформаційну основу: засоби фіксації і збору інформації; засоби передачі відповідних даних; засоби збереження інформації; засоби аналізу, обробки і представлення інформації. Взаємозв'язок ІС можна розглянути на рис. 5.

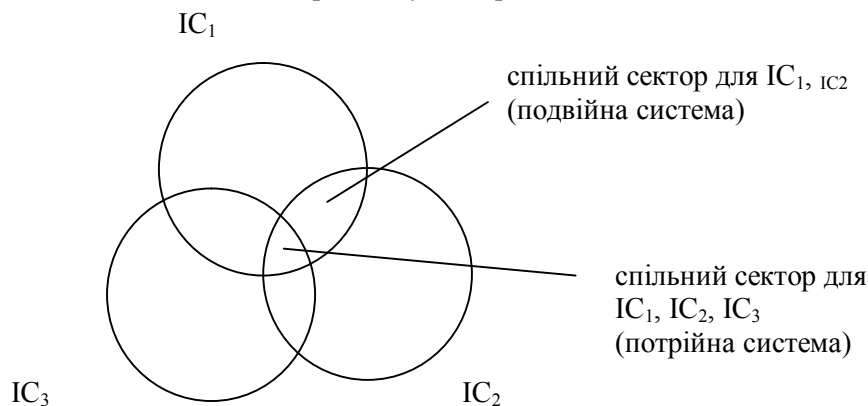


Рис. 5. Схеми взаємодії ІС

За ступенем автоматизації в СІС переважають автоматизовані ІС, де частина функцій (підсистем) керування або опрацювання даних здійснюється автоматично, а частина – автоматичні ІС, де усі функції керування й опрацювання даних здійснюються технічними засобами.

Оскільки ІС утворюються для задоволення інформаційних потреб в межах конкретної предметної галузі, то кожній предметній галузі (в сфері призначення) відповідає свій тип ІС. Перераховувати всі ці типи недоцільно, оскільки кількість предметних галузей велика.

В залежності від функціонального призначення можна виділити такі системи: управляючі, проєктувальні, наукового пошуку, діагностичні, моделювання, систем підготовки прийняття рішення та інші. Всі вони необхідні для налагодження комплексу ІС і їхньої правильної спільної роботи.

Використання різномірних ІС на єдиній базі даних дозволить зменшити кількість можливих помилок, прискорить час їх виявлення і усунення, пришвидшить оновлення інформації. Зміна чи доповнення інформації в спільних секторах для двох або декількох ІС призведе до всебічного огляду і перенесення в загальну базу в повному обсязі. В контексті даного питання, на нашу думку, слід розглянути загальну будову ядра як ІС, так і системи «Базис» в цілому. Структуру ядра подано на рис. 6.

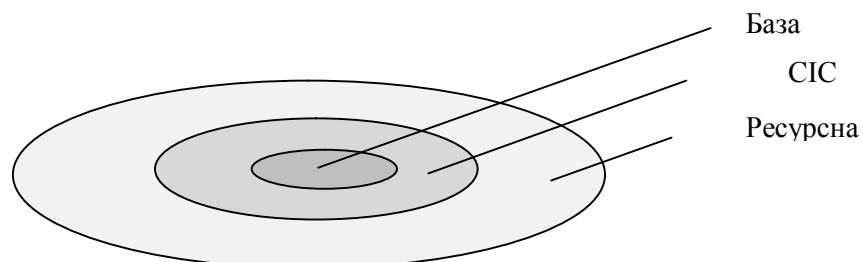


Рис. 6. Загальна будова ядра

Дії, які виконуються з інформацією в «Базисі» можна поділити на 3 стадії:

1) пошук; 2) опрацювання; 3) створення, захисти.

Соціальна мережа базису складається з вузлів і зв'язків. Вузлами можуть бути фізичні, юридичні особи, установи, організації, навіть цілі підприємства [1].

Зв'язками виступають усі можливі комунікаційні інструменти соціальних мереж та деякі спеціальні, наприклад, захищені канали зв'язку і кодовані повідомлення. З'єднання може проводитись через систему (перегляд сторінок користувачів, пошук у зовнішній базі) чи напряму від користувача до користувача, наприклад, миттєве повідомлення.

Для прикладу розглянемо порівняльну веб-статистику 2014 року:

– 3,146 млрд – загальна кількість зареєстрованих облікових записів електронної пошти (в 2011 році ця цифра складала 2,9 млрд);

– 969 млн – загальна кількість існуючих сайтів (у 2011 році було 346, у 2012 р. – 697 млн. сайтів);

– 3 користувачі на 1 сайт (у 2010 р. – 10 користувачів);

– 2,9 млрд – загальна кількість користувачів мережі Інтернет (станом на червень 2011 р. нас було 1,97 млрд);

– 1,32 млрд – кількість користувачів соціальної мережі Facebook за станом на червень 2014 року (на кінець 2011 року було 600 млн, 2012 рік – 800 млн.);

– 72 годин – відеоматеріалів, що завантажуються на сервіс YouTube щохвилини (у 2011 році ця цифра була 35 годин);

– 6 млрд – загальна кількість фотографій, розміщених на сервісі Flickr станом на серпень 2012 року (станом на вересень 2011 р. їх було 5 млрд);

– 150 млн. – активних користувачів Instagram.

За одну секунду у мережі Інтернет (березень 2015 р.):

– 9098 записів у Twitter;

– 2039 викладених фото у Instagram;

– 1906 записів у Tumblr;

– 1736 дзвінків у Skype;

– 27186 Гб використаного інтернеттрафіку;

– 48631 пошуків у Google;

– 100095 переглядів відео на YouTube;

– 2391408 відісланих електронних листів.

Наведені дані показують ріст мережі Інтернет. Адже, на нашу думку, саме він являється основним індикатором інформаційного росту. Але в світі, наповненому інформацією, ми стикаємось з феноменом «інформаційної кризи» – явище, при якому все важче знайти та обробити дані у величезному інформаційному полі. Інформації дуже багато і одночасно – дуже мало [1].

В даному випадку вже наведено часткову статистику з основних, нових інформаційних систем, що виникли і активно розвиваються сьогодні, але ми перерахуємо їх і відповідно дамо коротку характеристику кожній, для того щоб зрозуміти що це за система, які її особливості, як вона існує.

До основних соціальних мереж та систем, а також інформаційних мереж та сайтів відносять: Facebook; Google; «Вконтакті»; Вікіпедія; Skype; Twitter та багато інших. Розглянемо деякі з них і канали перенесення ними інформації.

1. Facebook – найпопулярніша соціальна мережа у світі, що почала працювати 4 лютого 2004 року як мережа для студентів деяких американських університетів. Засновником та головою сервісу є Марк Цукерберг. Станом на червень 2014 року кількість користувачів щомісяця становить 1,32 млрд людей, більше половини яких перевіряє свій аккаунт у Facebook щодня. За даними сайту AlexaFacebook є 2-им за відвідуваністю сайтом у світі та 6-им за відвідуваністю сайтом в Україні. Кількість українських користувачів Facebook на травень 2014 нараховує близько 6 млн. осіб. Головний офіс Facebook розташований у Менло-Парк, штат Каліфорнія, США. Основною статтею доходу компанії є реклама. Чистий дохід Facebook за 2013 рік становив 1,5 млрд доларів. За даними газети TheNewYorkTimes, капіталізація Facebook станом на 2 січня 2011 р. склала 50 мільярдів доларів.

2. Твіттер – соціальна мережа, яка є мережею мікроблогів, що дає змогу користувачам надсилати короткі текстові повідомлення (до 140 символів), використовуючи SMS, служби миттєвих повідомлень і сторонні програми-клієнти.

Згідно зі статистикою компанії Яндекс станом на осінь 2011 в Україні було зареєстровано 160 тисяч твітер-акаунтів–удвічі більше, ніж було у 2010 році. За рік Твіттер став ще україномовнішим. Якщо в 2010 році українською хоч інколи твітили 29 % твітерян України (тоді це становило 23 тисячі тві-користувачів), то зараз таких 45%, тобто 72000. Середня кількість символів у твіті з України — 69. Це трохи більше, ніж в Росії – у середньому 66 символів. А твіт українською мовою довший ще на один символ, його довжина — 70 символів.

3. VK.com, ВКонтакті – друга найбільша соціальна мережа у Європі після Facebook. Популярна здебільшого серед російськомовних користувачів, особливо в Росії, Білорусі, Казахстані, Україні та Узбекистані. Станом на січень 2014 року ВКонтакті нараховувала 239 млн. акаунтів, з яких 55 млн. відвідуються щодня. Згідно рейтингу Alexa сайт є 21-шим за відвідуваністю у світі і 2-гим у Росії (після Яндекса). В Україні соцмережа станом на травень 2014 нараховувала близько 11,5 млн. користувачів.

ВКонтакті почала працювати 10 жовтня 2006 року і спочатку позиціонувалася як соціальна мережа для випускників російських вузів (своєрідний аналог американській Facebook). У січні 2009 ВКонтакті вперше обігнав за відвідуваністю свого головного конкурента — іншу російську соцмережу «Однокласники».

Станом на липень 2014 власниками ВКонтакті є Mail.ruGroup (52 % акцій) та фонд UnitedCapitalPartners (48 %), яким володіє російський підприємець Ілля Щербович. Чистий прибуток ТОВ «ВКонтакті» в 2013 році знизився більше, ніж у шість разів, та склав 7,9 млн. рублів (біля 221 тис. доларів) у порівнянні з 50 млн. рублів попереднього року. У той же час, сумарна виручка за цей рік становила 5,7 млрд. рублів, що на 18,7% більше, ніж за 2012 рік.

4. Skype – програмне забезпечення для інтернет-телефонії VoIP, створене двома підприємцями Нікласом Зеннстрьомом та Янусом Фріссом, також засновниками файлообмінної мережі Kazaa. Вона конкурує з існуючими відкритими VoIP протоколами, такими як SIP, IAX та H.323. Група Skype, придбана компанією eBay у жовтні 2005, розташована в Люксембурзі, з офісами в Лондоні, Таллінні і Празі. 2009eBay продала більшу частину акцій Skype групі інвестиційних фондів. Від 2011 власником Skype є Microsoft.

Повідомлено, що 43 мільйони користувачів Skype одночасно були активні 4 жовтня 2012. В цілому, кількість акантів в Skype перевищує позначку в 1 млрд.

SR Consulting у жовтні 2005 переглянуло 4 мільйони профайлів користувачів Skype і надало деяку демографічну інформацію, повідомлену Новинами й Журналом Skype:

1) середній вік: 29,7 років;

2) близько 46% користувачів Skype – жителі Європи. Бразилія й Китай мають найбільше користувачів Skype. Китай має 13 % населення користувачів Skype [6].

Розглянувши декілька Інтернет-ресурсів також слід відмітити наступне (загалом інформація дана по серверу Яндекс, однак вона чудово відображає динаміку використання соціальних мереж в Україні):

За даними Яндексу (який, до речі, нарешті навчився відрізняти українські блоги від російських і, можливо, навіть зробить цю статистику доступною для всіх користувачів) кількість українських блогів за останній рік зросла у 2,2 рази. Сьогодні в Україні налічується 260000 блогів. Швидкість приросту дещо зменшилася у порівнянні з минулим роком, але, незважаючи на це, вона вища, ніж у російській блогосфері і набагато вища, ніж у світі!

Найбільш затребуваною платформою українських блогерів (якщо називати українськими тих, хто проживає тут або користується доменами в зоні .ua) виявилася платформа Liveinternet – 142 000 українських блогів. На другому місці – платформа mail.ru, приріст українських блогів на якій склав 600%. На третьому – закономірна, як на нас, платформа LiveJournal.

Доцільно відмітити дані про автономні українські блоги. Сьогодні їх налічується близько 4300, що на 230% більше, ніж у 2010 році. Вражає, що приріст виявився настільки високим.

Зріс і середній вік українського блогера – тепер йому 24 роки (а було 23). Як сказав представник Яндекса: «За рік українські блогери стали старшими на рік». Стосовно кількості блогерів, відомо лишень, що у минулому році кількість українських блогів складала 7% від загального розміру української блогосфери. Сьогодні їх більше. Можливо – 10%, а можливо – 50% чи 90%. Хоча, на нашу думку, реальна цифра ближча до першого, ніж до другого чи третього значення.

Успішність українських блогів значною мірою залежить від розвиненості самого ринку Інтернету. Саме тому автори окремо встановлених щоденників зазвичай з таким інтересом спостерігають за збільшенням кількості користувачів, які у майбутньому можуть стати як

колегами-блогерами, так і просто лояльними відвідувачами їхніх ресурсів. Зрештою, без аудиторії успіх неможливий. А Україна дає нам всі підстави вірити у швидкий розвиток національної блогосфери, адже кількість користувачів Інтернету невпинно зростає.

В підсумковому документі Держзв'язку «Галузь зв'язку: результати роботи в першому півріччі 2008-го року (станом на 01.07.2008)» стверджується, що чисельність користувачів Інтернету в Україні досягнула поділки 10 млн. осіб.

За даними Держзв'язку, послугою доступу в Інтернет в Україні сьогодні можуть користуватися 55% родин або 21,6% населення країни.

Нагадаємо, компанія Sputnikmedia.net і найбільший український портал Bigmir.net опублікували глобальну статистику відвідуваності українського Інтернету за червень 2010 року – виявилось, що чисельність користувачів у перший літній місяць зменшилася на 3,9% у порівнянні із травнем і склала 8140922 користувачів [4].

Розглянувши цю статистику, слід визначити, яке ж саме місце посідає інформація, отримана з соціальних мереж в загальній кількості всієї інформації. На нашу думку ранжування потоків можна провести наступним чином:

1. Інформація що отримується з уст в уста – це інформація що передається безпосередньо, найсильніший канал передачі інформації з найбільшим впливом на оточуючих.

2. Соціальні мережі – цей канал сформувався не так давно, але уже є другим за силою впливу на маси. Якщо згадати наш «Майдан», то дуже багато людей вийшли на нього, прочитавши повідомлення власне в своїх соціальних мережах. Цей канал найбільш інноваційний і постійно та динамічно розвивається, якщо починалося все з того, що можна було лише відправляти невеликі повідомлення та переглядати фотографії, то тепер відео-конференції, Інтернет-банкінг, передача великих повідомлень з прикріпленими файлами – все це стало можливим.

3. Телебачення – слабший канал за перші два, але також досить важливий, в цілому цей канал зорієнтований на людей, які обережно ставляться до інновацій і на людей «старого покоління». Загалом цей канал не спрямований для повномасштабного передавання інформації, адже більшість старших людей дивляться по ТВ серіали, фільми і лише деколи новини, що і показує слабкість цього каналу.

4. Газети та журнали – порівняно слабкий канал передачі інформації. Сьогодні, з розвитком ІТ, він відходить на другий план, зорієнтований на старших людей, які звикли виписувати газети і журнали. В порівнянні з попередніми каналами обсяг інформації в пресі та в журналах є досить обмеженим, через що, на нашу думку, цей канал передачі інформації не є настільки розвиненим.

5. Радіо – на нашу думку, цей канал є найслабшим з усіх попередніх. Він має найменший вплив на маси і тому не стимулює їх до діяльності. Даний канал розрахований також на людей старшого покоління, але використовується вкрай рідко, часто не є досить інформативним, через що такий канал практично не несе інформації.

Таким чином, показано, що канал – соціальні мережі є досить популярний в людей всіх вікових категорій. Даний канал має високу стимулюючу дію і змушує людей діяти, виконувати певні завдання, а також з усіх інших, цей канал є найбільш інформативним. Тому, ми вважаємо, що за такими інформаційними інноваціями майбутнє [7].

Висновки. Проблема інформаційного забезпечення інноваційного на сьогоднішній час дуже гостро стоїть в Україні. Вирішення її вбачається в розробці спеціальної системи «Базис», адже Інтернет-інформація і її послуги є найбільш інноваційними в сфері інформаційного забезпечення, людина може отримати і зберігати величезні обсяги інформації не загромаджуючи багато місця на своєму персональному ПК, що є дуже зручно для користувачів. Тим більше, на даний час соціальні мережі є другим каналом за силою впливу на маси, що свідчить про те, що майбутнє за цими новими інформаційно-інноваційними технологіями.

1. Рудь Н. Т. Обґрунтування можливості використання динамічної інформаційної системи «Базис» в інноваційних процесах / Н. Рудь, О. Марчук // Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті: [матеріали XIII міжнародного наукового семінару] / за наук. ред. д.е.н., проф. М.М. Єрмошенка. – К.: Національна академія управління, 2014. – С.165–170.
2. Денисенко М. П. Інформаційне забезпечення інноваційно-інвестиційної діяльності підприємства / М. П. Денисенко, Т. С. Голубева, І. В. Колос // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку: зб. наук. пр. – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2009. – С. 193–196.
3. Рудь Н. Економіка і організація інноваційної діяльності: навч. посібник / Н. Рудь. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2007. – 476 с.
4. [Електронний ресурс]: www.Bigmir. Net
5. Інформація. [Електронний ресурс]: <http://te.zavantag.com/docs/1554/index-27105.html>
6. Воронков В. І. Проблеми створення інформаційно-аналітичної системи на основі використання системи оперативних даних / В. І. Воронков // Науково-технічна інформація. – 2013. – №3(57) – С.37–46.
7. Березняк Н. В. Деякі питання розбудови інформаційної інфраструктури науково-технічної й інноваційної діяльності в Україні / Н. В. Березняк, Т.К. Кваша, Ч. В. Новицька // Науково-технічна інформація. – 2012. – №4(54). – С. 3–8.

Стаття надійшла в редакцію 30.04.2015.

І. В. Севостьянов

Вінницький національний технічний університет

ВІБРОУДАРНЕ ЗНЕВОДНЕННЯ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

У статті наводиться схема гідроімпульсної установки для віброударного зневоднення відходів харчових виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, кавового шלאму), що дозволяє здійснювати їх ефективну утилізацію. Розглядається механізм процесів віброударного зневоднення відходів у прес-формі, наводяться рівняння для розрахунку зміни тиску у середовищі відходів, від якого залежить продуктивність робочого процесу.

Ключові слова: віброударне зневоднення, відходи харчових виробництв, гідроімпульсна установка.

И. В. Севостьянов

ВИБРОУДАРНОЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ОТХОДОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ.

В статье приводится схема гидромпульсной установки для виброударного обезвоживания отходов пищевых производств (спиртовой барды, пивной дробины, свекольного жома, кофейного шлама), позволяющая осуществлять их эффективную утилизацию. Рассматривается механизм процессов виброударного обезвоживания отходов в пресс-форме, приводятся уравнения для расчета изменения давления в среде отходов, от которого зависит производительность рабочего процесса.

Ключевые слова: виброударное обезвоживание, отходы пищевых производств, гидромпульсная установка.

I.V. Sevostyanov

VIBRO-BLOWING DEHYDRATION OF A WASTE OF FOOD MANUFACTURES.

The scheme of hydraulic pulse installation for vibro-blowing dehydration of a waste of food manufactures (spirit bards, a beer pellet, beet press, coffee slime), allowing to carry out their effective recycling, is presented in this article. The mechanism of processes vibro-blowing dehydration of a waste in a compression mould is considered, the equations for calculation of pressures change in the environment of a waste on that productivity of working process depends are resulted.

Keywords: vibro-blowing dehydration, a waste of food manufactures, hydraulic pulse installation.

Віброударне зневоднення є одним з найбільш ефективних способів видалення рідини з відходів харчових виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, кавового та ячмінного шלאму), що дозволяє використовувати їх як цінну високопоживну добавку до сільськогосподарських кормів або в якості палива [1]. Так, при реалізації віброударного зневоднення спиртової барди, бурякового жому та кавового шלאму на дослідному гідроімпульсному стенді їх кінцева вологість U_k не перевищувала 20 – 24% [2]. Для порівняння: при здійсненні статичного пресування цих самих відходів на шнекових пресах та декантерних центрифугах їх кінцева вологість не нижча 30 – 76%, що змушує перед використанням відходів в якості корму або палива здійснювати їх додаткове сушіння. Останнє призводить до суттєвого підвищення загальної енергоємності процесу зневоднення, оскільки навіть у випадку застосуванні найбільш економічних вакуумних сушарок витрати енергії складають порядку 740 – 760 кВт/т, тоді як при віброударному зневодненні вони не більші 90 кВт/т [2]. Хімічні та біологічні способи зневоднення порівняно малопродуктивні (тривалість фазового розділення з їх допомогою порції відходів – від 10 до 40 год), а обладнання для реалізації цих способів дуже громіздке і дороге [1, 2].

Для широкого впровадження віброударного зневоднення на виробництві потрібно розробити схеми високоефективного промислового обладнання, на якому здійснюється пропонований спосіб. Крім цього, необхідно отримати залежності для визначення основних робочих параметрів процесу (в тому числі, зміни тиску у середовищі відходів під час їх віброударного зневоднення), що дозволить у подальшому вибирати найбільш раціональний режим його реалізації. Вказані завдання розв'язуються у даній роботі.

На рис. 1 представлена спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення відходів харчових виробництв в складі шнекового преса та гідроімпульсної вібропресової установки. Шнековий прес, закріплений на рамі 7 містить планетарний мотор-редуктор 1, що через пружну муфту 2 приводить в обертання шнек 3, розташований у внутрішньому циліндрі 4. У станках останнього виконане велике число дрібних наскрізних отворів (на схемі не показані), закритих з середини фільтрувальною сіткою. Внутрішній циліндр 4 установлений в середині зовнішнього циліндра 5 порожнина якого за допомогою трубки 29

пов'язана з баком 16. В свою чергу, циліндр 4 сполучається через гофрований гумовотканинний рукав 6 з прес-формою гідроімпульсної вібропресової установки, що складається з днища 25 та двох бокових стінок 31, у яких виконані наскрізні дрібні отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою. Днище 25 жорстко пов'язане із плунжером гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода (ГІП) [3]. Гідроциліндр змонтовано на верхній поперечині 14 станини установки, що включає також колони 12 й нижню поперечину 13, установлену на віброопорах. Прес-форма пружно пов'язана із поперечиною 14 за допомогою чотирьох пружин 15, якими у вихідному положенні підтискається до запліччя поперечини та до чотирьох упорів 20. Пуансон 10 з виступами 21 на нижній поверхні утримується над днищем 25 чотирма пружинами 18, що спираються на планки 19, жорстко прикріплені до стінок 31. З пружинами 18 пуансон зв'язують прикріплені до нього планки 24, що навантажені інерційними масами 8, одягнутими на штифти 9.

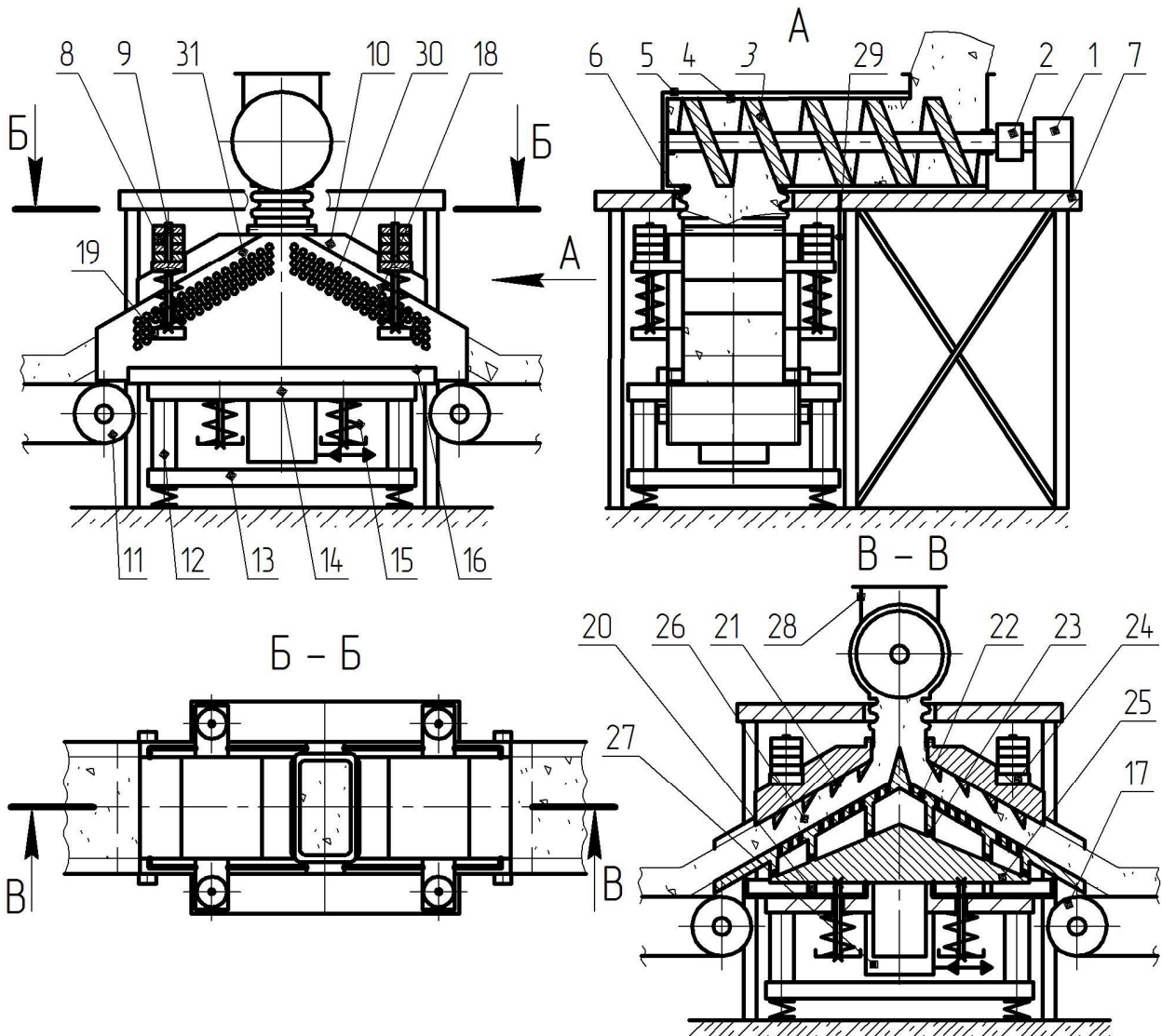


Рис. 1. Спрощена конструктивна схема технологічного комплексу для зневоднення відходів харчових виробництв

Працює технологічний комплекс таким чином. Відходи харчових виробництв з початковою вологістю $U_n = 90 - 95\%$ подаються безперервним потоком через патрубок 28 у шнековий прес, шнек 3 якого обертається, стискаючи відходи у внутрішньому циліндрі 4. Видалена з них рідина стікає через фільтрувальну сітку, що затримує тверді частинки відходів. Далі рідина проходить через отвори у циліндрі 4, збирається у зовнішньому циліндрі 5 й по трубці 29 відводиться у бак 16. Попередньо зневоднена до вологості 70 – 75% тверда фаза відходів витискається з циліндра 4 і через гумовотканинний рукав 6 подається у прес-форму гідроімпульсної вібропресової установки, у порожнину між днищем 25, пуансоном 10 та боковими стінками 31. Відходи безперервно переміщуються уздовж цієї порожнини (див. розріз В – В на рис. 1) до стрічкових конвеєрів 11, 17. У порожнині гідроциліндра 27 гідроімпульсного привода періодично змінюється тиск робочої

рідини в діапазоні від 4 до 11 МПа. Так, при збільшенні тиску плунжер гідроциліндра 27 й разом з ним прес-форма з відходами 26 всередині швидко піднімаються вгору з прискоренням, що дорівнює $(8 \div 10)g$ [3]. При цьому стискаються пружини 15, а відходи 26 піддаються інерційному навантаженню, що створює пуансон 10 з інерційними масами 8. Під час різкого падіння тиску робочої рідини у порожнині гідроциліндра 27 прес-форма з відходами 26 та пуансон 10 з масами 8 під дією сили власного тяжіння та сили пружності стиснених пружин 15 опускаються у вихідне нижнє положення з ударом днища 25 наприкінці ходу об запліччя поперечини 14 та об упори 20. Даний ударний імпульс передається нижнім шарам відходів 26. Одночасно їх верхні шари стискаються підпружиненим відносно прес-форми пуансоном 10. Таким чином, при повторенні описаного циклу прес-форма та пуансон здійснюють вертикальні зворотно-поступальні переміщення з частотою ν до 60 Гц і амплітудою a до 2,5 мм, внаслідок чого відходи 26, які переміщуються від рукава 6 до конвеєрів 11, 17 піддаються віброударному інерційному навантаженню, що сприяє інтенсивному видаленню з них рідкої фази. Остання проходить через отвори 22, 30, закриті з середини фільтрувальною сіткою й стікає по отворах 23 та по стінках 31 у бак 16, звідки йде на фільтрування. Зневоднена у прес-формі до вологості 25 – 30% тверда фаза відходів скидається на конвеєри 11, 17.

Перевагами даної схеми установки для віброударного зневоднення відходів у порівнянні із схемами пропонованими раніше [2] є простота конструкції, надійність, забезпечення безперервності робочого процесу, а також те, що при використанні установки практично усувається ймовірність забивання прес-форми твердою фазою відходів, що зневоднюються. Крім цього, під час проектування креслень установки може бути використано багато добре відпрацьованих й перевірених на практиці конструкцій вузлів іншого вібропресового обладнання [3].

Розглянемо цикл віброударного навантаження відходів харчових виробництв у прес-формі на гідроімпульсній установці (див. рис. 1). На рис. 2 представлені осцилограми зміни тиску p_r робочої рідини у гідроциліндрі ГП з віброзбуджувачем «на вході» [3] та переміщення z_I вібростолу експериментального гідроімпульсного стенда-прототипу установки при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу.

На I-му етапі навантаження відходів при збільшенні p_r від мінімального – $p_{r,\min}$ до максимального – $p_{r,\max}$ значення (див. рис. 2, а) відбувається швидке переміщення прес-форми з відходами з вихідного у верхнє положення, що характеризуються координатами $z_{I\min}$, $z_{I\max}$ (див. рис. 2, б). Одночасно має місце переміщення пуансона z_{II} , але внаслідок пружної деформації відходів під впливом сили інерції пуансона і інерційних мас, величина z_{II} у будь-який момент часу I-го етапу буде меншою за z_I . Поточні значення z_I та z_{II} на даному етапі визначаємо за допомогою диференціальних рівнянь руху

$$m_I(\ddot{z}_I + g) = p_{r,\max} S_r - \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_B) - c_d(z_{0d} + z_I) - c_n(z_{0n} + z_I) - c_B z_I - R_I; \quad (1)$$

$$m_{II}(\ddot{z}_{II} + g) = c_n(z_{0n} + z_I - z_{II}) + c_B(z_I - z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_B; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (2)$$

де m_I – маса нижнього виконавчого елемента установки (включає маси плунжера гідроциліндра 27, днища 25, стінок 31, порції відходів 26 та планок 19 – див. рис. 1); m_{II} – маса верхнього виконавчого елемента установки (включає маси пуансона 10, штифтів 9 та планок 24, а також інерційні маси 8); S_r – площа поперечного перерізу плунжера гідроциліндра 27; α_I , α_B – коефіцієнти в'язкого демпфірування при переміщенні плунжера гідроциліндра 27 та твердих частинок відходів у прес-формі [2]; c_d , c_n – коефіцієнти жорсткості пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; c_B – коефіцієнт жорсткості під час пружного деформування відходів 26; z_{0d} , z_{0n} – попереднє стискання пружин, що пов'язані з днищем 25 та з пуансоном 10; R_I – сила сухого тертя в ущільненнях плунжера гідроциліндра 27 (може бути визначена за методикою [4]); t_I – тривалість I-го етапу циклу навантаження, що відповідає тривалості відкриття t_0 віброзбуджувача ГП установки, приєднаного за схемою «на вході» [2, 3].

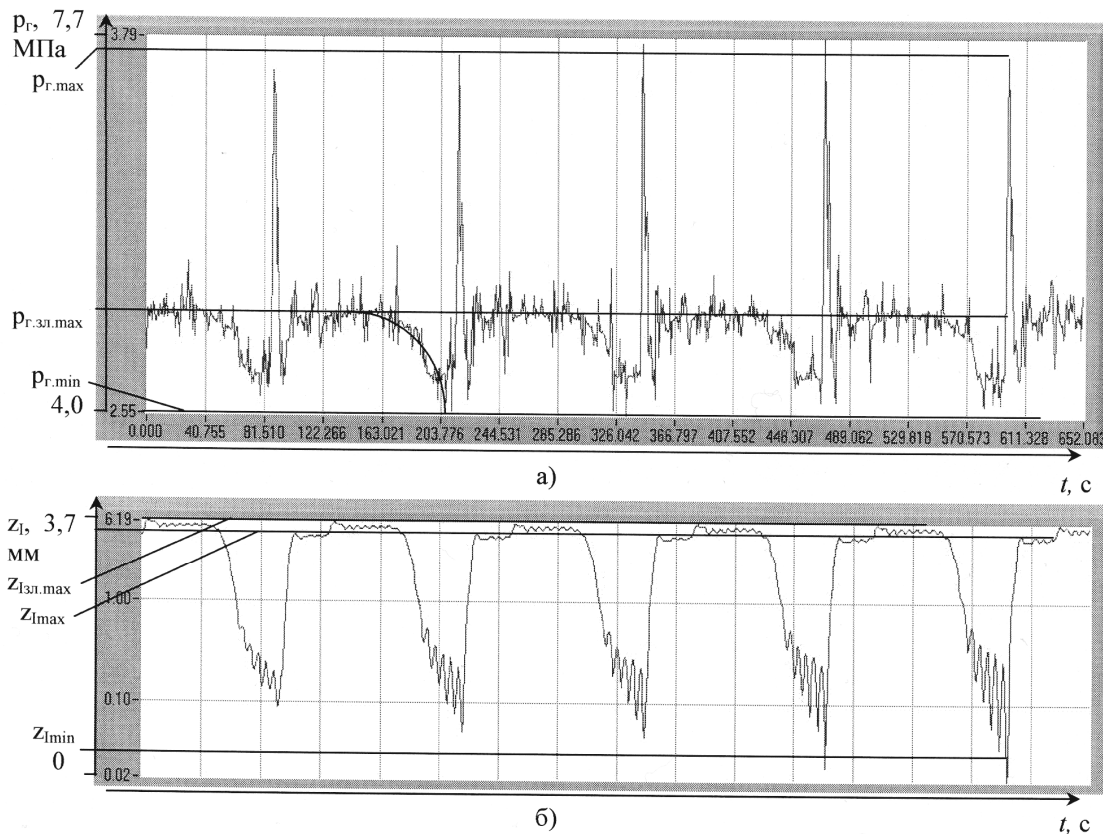


Рис. 2. Осцилограми зміни: а – тиску p_r робочої рідини у гідроциліндрі ГП; б – переміщення z_l вібростілу експериментального гідроімпульсного стенда при віброударному зневодненні на ньому порції концентрату кавового шламу

На II-му етапі навантаження відходів у прес-формі тиск p_r спочатку падає від $p_{r,max}$ до $p_{r,min}$, а далі дещо піднімається до $p_{r,зл,max}$ (див. рис. 2, а), що обумовлено, на нашу думку, ударно-хвильовими процесами у зливній гідролінії ГП [2, 5]. Завдяки цьому вібростіл стенду-прототипу у продовж практично всього розглядуваного етапу утримується засиллям, створюваним тиском робочої рідини $p_{r,зл,max}$ у верхньому граничному положенні з координатою $z_{л,зл,max}$ (див. рис. 2, б), здійснюючи лише незначні за амплітудою коливання згідно із синусоїдальним законом. Оскільки амплітуда цих коливань складає біля 1% від величини $z_{л,зл,max}$, їх можна не брати до уваги і з метою спрощення аналізу вважати, що на II-му етапі прес-форма, а отже й верхній виконавчий елемент стенду є нерухомими:

$$z_I(t) = z_I(t_I); \quad z_{II}(t) = z_{II}(t_I); \quad t_I < t \leq t_{II}, \quad (3)$$

де t_{II} – тривалість II-го етапу (див. нижче).

На III-му етапі в результаті затухання ударно-хвильових процесів у зливній гідролінії ГП тиск p_r зменшується від $p_{r,зл,max}$ до $p_{r,min}$ (див. рис. 2, а), таким чином, вібростіл повертається у вихідне положення (координата $z_{l,min}$ – див. рис. 2, б). Змоделювати зміну p_r на розглядуваному етапі достатньо складно, тому можна з достатньо високою точністю описати її за допомогою емпіричної формули (рівняння еліпса), складеної за відповідною ділянкою осцилограми (див. рис. 2, а). Апроксимована залежність p_r на III-му етапі показана на осцилограмі тонкою плавною кривою

$$p_r(t) = \sqrt{1 - \frac{(t - 0,063)^2}{0,063^2}} + 4; \quad t_{II} < t \leq t_{III}, \quad (4)$$

де t_{III} – тривалість III-го етапу за осцилограмою на рис. 2, б приблизно дорівнює одній третині періоду T_{II} циклу віброударного навантаження. Тобто

$$t_{III} = \frac{1}{3} T_{II} = \frac{1}{3 \cdot v}, \quad (5)$$

де v – частота циклів навантаження. Тоді тривалість II-го етапу циклу

$$t_{II} = T_{II} - t_I - t_{III} = \frac{1}{v} - t_o - \frac{1}{3 \cdot v}.$$

На практиці для отримання залежності для розрахунку $p_r(t)$ на будь якому іншому режимі роботи установки для зневоднення відходів достатньо зняти на цьому режимі на стенді-прототипі осцилограму $p_r(t)$ і скласти за нею для III-го етапу робочого циклу відповідну емпіричну формулу (як показали проведені нами численні дослідження зі зневоднення на стенді-прототипі різних відходів, їх вид не впливає на характер залежності $p_r(t)$ [2]).

Рівняння руху виконавчих елементів установки на III-му етапі мають вигляд

$$m_I(\ddot{z}_I + g) = p_r(t) \cdot S_r + \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_B) - c_d(z_{0d} + z_{I_{max}} - z_I) - c_n(z_{0n} + z_{I_{max}} - z_{I_{max}} - z_I) - c_b(z_{I_{max}} - z_I) + R_I; \quad t_{II} < t \leq t_{III}; \quad (6)$$

$$m_{II}(\ddot{z}_{II} + g) = c_n(z_{0n} + z_{I_{max}} - z_I + z_{II}) + c_b(z_{I_{max}} - z_{I_{max}} - z_I + z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_B, \quad (7)$$

де $z_{I_{max}}$ та $z_{II_{max}}$ визначаються за рівняннями (1, 2) для моменту часу $t = t_I$.

Тепер розглянемо, як буде змінюватись тиск у середовищі відходів під час їх віброударного зневоднення на гідроімпульсній установці на різних етапах циклу спрацювання ГПП та на різних ділянках прес-форми.

На I-му етапі циклу при переміщенні прес-форми вверх стискатись будуть в основному ділянки відходів, що прилягають до днища 1 та до пуансона 2 (рис. 3). Товщини нижнього – $h_{нI}$ та верхнього – $h_{вII}$ стиснених шарів на даному етапі будуть відповідати переміщенням днища – z_I та пуансона z_{II} , тобто

$$h_{нI}(t) = z_I(t) \cdot \cos \gamma; \quad h_{вII}(t) = (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot \cos \gamma; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (8)$$

де γ – кут нахилу верхньої робочої поверхні днища 1 (рис. 3).

Тиски у нижньому – $p_{в,нI}$ та у верхньому – $p_{в,вII}$ стиснених шарах визначаємо з використанням відповідних рівнянь руху (1, 2)

$$p_{в,нI}(t) = \frac{p_{r,max} S_r - m_I(\ddot{z}_I + g) - \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_B) - c_d(z_{0d} + z_I) - c_n(z_{0n} + z_I) - c_b z_I - R_I}{S_d}; \quad (9)$$

$$p_{в,вII}(t) = \frac{c_n(z_{0n} + z_I - z_{II}) + c_b(z_I - z_{II}) - \dot{z}_{II}\alpha_B - m_{II}(\ddot{z}_{II} + g)}{S_n}; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (10)$$

де S_d , S_n – площі верхньої поверхні днища та нижньої поверхні пуансона (при визначенні S_d від добутку довжини L_d й B_n ширини даної поверхні слід відняти площу поперечного перерізу всіх виконаних у днищі отворів 3: $S_d = L_d B_n - S_{\text{отв}}$); площа визначається як $S_n = L_{n2} B_n$.

Тиск у середніх шарах відходів у прес-формі – $p_{в,сI}(t)$ буде залежати в основному від сили інерції пуансона 2 з інерційними масами 4 та від сили пружності, створюваної пружинами, що зв'язують пуансон з прес-формою (див. також рис. 1)

$$p_{в,сI}(t) = \frac{m_{II} g - c_n z_{0n}}{S_n}; \quad 0 \leq t \leq t_I, \quad (11)$$

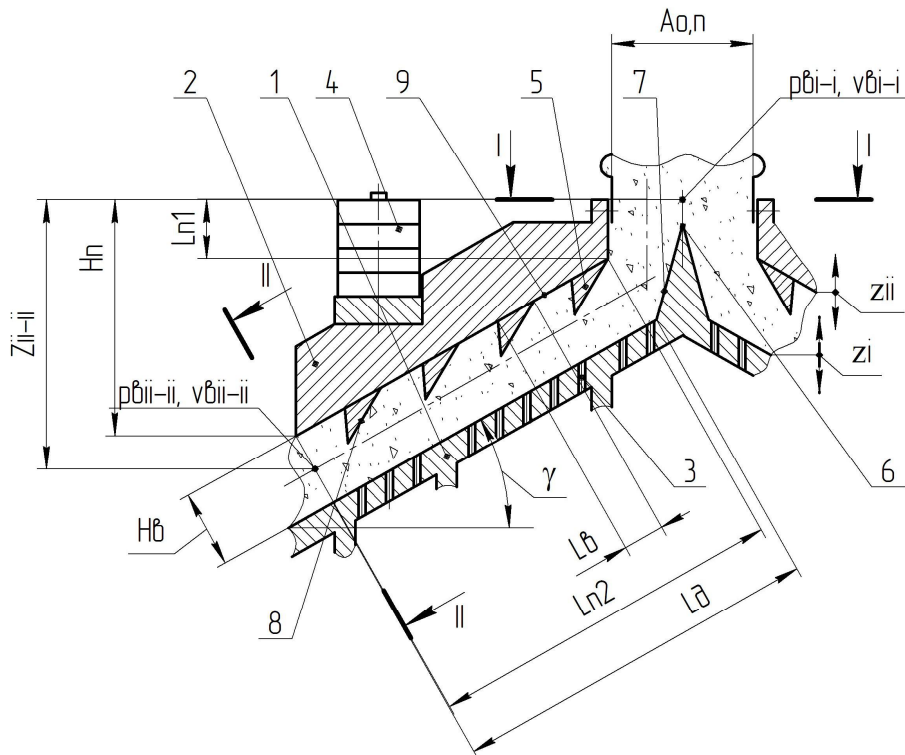


Рис. 3. Схема навантаження та руху відходів у прес-формі установки для віброударного зневоднення

тоді як зміну товщини даного середнього шару у продовж I-го етапу знаходимо як

$$h_{cl}(t) = H_b - h_{nI}(t) - h_{vI}(t); 0 \leq t \leq t_I, \quad (12)$$

де H_b – початкова товщина шару відходів у прес-формі.

На II-му етапі циклу при практично нерухомих пуансоні та прес-формі відходи у останній піддаються в основному статичному навантаженню, створюваного силою тяжіння пуансона 2 з інерційними масами 4, а також силою пружності стиснених пружин. Підвищений тиск $p_{v,II}(t)$, $p_{b,II}(t)$ створений на попередньому етапі у нижніх та верхніх шарах прес-форми в результаті переміщень днища та пуансона, на II-му етапі поширюється хвилями у середніх шарах [2]. Відбувається рівномірне перерозподілення твердих частинок відходів у прес-формі з їх більш щільним укладанням та витисканням з проміжків між ними рідини, яка в решті решт витискається з прес-форми [2, 3]. Але вказані коливання твердих частинок досить швидко затухають, тому можна з високим ступенем наближення вважати, що тиск $p_{v,II}(t)$ у середовищі відходів у прес-форми на розглядуваному етапі є приблизно однаковим по її висоті й рівним

$$p_{v,II}(t) = \frac{m_{II}g + c_{II}(z_{0II} + z_{I\max} - z_{I\max}) - c_b(z_{I\max} - z_{I\max})}{S_{II}}; t_{II} < t \leq t_{III}. \quad (13)$$

На III-му етапі циклу віброударного зневоднення виконавчі елементи установки рухаються вниз. При цьому у верхніх шарах відходів у прес-формі, що прилягають до пуансона та в їх нижніх шарах, які контактують із днищем, виникатиме розрідження. Внаслідок того, що швидкості переміщення виконавчих елементів у вихідні нижні положення є меншими, ніж швидкості їх переміщення вгору на I-му етапі (див. рис. 2, б), тиск $p_{v,III}(t)$ у середніх шарах буде також встигати змінюватись. Останнє обумовлене збільшенням об'єму, що займають відходи у прес-формі [2, 5]. Хвилі тиску $p_{v,III}(t)$, що вирівнює будуть відходити від верхньої і нижньої меж середнього шару відходів у прес-формі в напрямках до пуансона 2 та до днища 1. Швидкості переміщення вказаних хвиль буде приблизно відповідати швидкості руху виконавчих елементів установки. Таким чином, з врахуванням рівнянь (6, 7), залежності для визначення тиску у нижніх – $p_{v,III}(t)$, середніх – $p_{v,III}(t)$ та верхніх – $p_{v,III}(t)$ шарах відходів у прес-формі на III-му етапі циклу, матимуть вигляд

$$p_{в.нIII}(t) = \left[\begin{array}{l} p_r(t) \cdot S_r + \dot{z}_I(\alpha_I + \alpha_B) - m_I(\ddot{z}_I + g) - c_d(z_{0d} + z_{I\max} - z_I) - \\ - c_n(z_{0n} + z_{I\max} - z_{I\max} - z_I) - c_B(z_{I\max} - z_I) + R_I \end{array} \right] / S_d; \quad t_{II} < t \leq t_{III}; \quad (14)$$

$$p_{в.сIII}(t) = p_{вII}(t) - \frac{\Delta V_{вIII} K_B}{V_{вII}} = p_{вII}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot B_n L_d \cos \gamma + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot B_n L_{n2} \cos \gamma] K_B}{H_B - h_{нI\max} - h_{вI\max}} =$$

$$= p_{вII}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot L_d + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot L_{n2}] B_n K_B \cos \gamma}{H_B - [z_{I\max} \cdot L_d + (z_{I\max} - z_{II\max}) \cdot L_{n2}] B_n \cos \gamma} = p_{вII}(t) - \frac{[z_I(t) \cdot L_d + (z_I(t) - z_{II}(t)) \cdot L_{n2}] K_B}{H_B - [z_{I\max} \cdot L_d + (z_{I\max} - z_{II\max}) \cdot L_{n2}]};$$

$$p_{в.вIII}(t) = \frac{c_n(z_{0n} + z_{I\max} - z_I + z_{II}) + c_B(z_{I\max} - z_{I\max} - z_I + z_{II}) - \dot{z}_{II} \alpha_B - m_{II}(\ddot{z}_{II} + g)}{S_n}, \quad (16)$$

де $\Delta V_{вIII}$ – зміна робочого об'єму прес-форми на III-му етапі; $V_{вII}$ – робочий об'єм прес-форми на II-му етапі; K_B – модуль об'ємної пружності відходів [2, 5].

Розрідження $p_{в.вIII}(t)$, $p_{в.нIII}(t)$ (див. формули 14, 16), на нашу думку, виникатимуть на даному етапі тільки у мінімальних за товщиною шарах відходів у прес-формі, що безпосередньо прилягають до робочих поверхонь днища 1 та пуансона 2. В основному ж об'ємі прес-форми на III-му етапі тиск буде дорівнювати $p_{в.сIII}(t)$ (див. формулу 15).

Також під час віброударного зневоднення відходів тиск в їх середовищі створюється завдяки опору при рівномірному переміщенні відходів від входу у прес-форму до виходу з неї. Дане переміщення забезпечується шнековим пресом, а опір переміщенню створюється за рахунок внутрішнього тертя у середовищі відходів та під час проходження ними місцевих опорів – вхідного та вихідного перерізів пуансона, а також виступів 5 [5]. Для визначення даних опорів потрібно прийняти ще одне припущення. У роботі [6] обґрунтовано, що під час вібраційного навантаження вологих дисперсних матеріалів, до яких відносяться й розглядувані відходи харчових виробництв, у випадку переміщення їх частинок з прискореннями, що перевищують g , матеріали переходять у стан віброкипіння. В даному стані матеріал поводить себе, як Ньютонівська рідина, що дозволяє суттєво спростити аналіз процесів його зневоднення.

Як вказувалось вище, під час роботи вібропресової установки її виконавчі елементи і разом з ними частинки відходів у прес-формі переміщуються з прискореннями $(8 \div 10)g$, таким чином вони також будуть знаходитись у стані віброкипіння, отже для опису процесів віброударного зневоднення можуть застосовуватись рівняння гідравліки.

Зокрема, рівняння Бернуллі [5] для вхідного I – I та вихідного II – II перерізів матиме вигляд

$$Z_{II-II} + \frac{p_{вI-I}(t)}{\rho_B(t) \cdot g} + \frac{v_{вI-I}^2}{2 \cdot g} = \frac{p_{вII-II}}{\rho_B(t) \cdot g} + \frac{v_{вII-II}(t)^2}{2 \cdot g} + h_\Sigma(t); \quad 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (17)$$

де Z_{II-II} – вертикальна координата центру ваги перерізу I – I відносно центру ваги перерізу II – II у продовж циклу віброударного навантаження; $p_{вI-I}(t)$, $p_{вII-II}$, $v_{вI-I}$, $v_{вII-II}(t)$ – поточні тиски та середні швидкості частинок потоку відходів у перерізах I – I та II – II; $\rho_B(t)$ – поточна середня густина відходів; $h_\Sigma(t)$ – сумарні втрати напору потоку відходів між перерізами I – I та II – II, обумовлені внутрішнім тертям в їх середовищі та місцевими опорами [5].

Величину Z_{II-II} знаходимо за формулою

$$Z_{II-II} = H_n + \frac{H_B}{2} \cos \gamma, \quad (18)$$

де H_n – висота пуансона 2.

Густина $\rho_B(t)$ визначаємо як [5]

$$\rho_B(t) = \frac{\rho_B}{1 - \beta_B p_B(t)}; 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (19)$$

де ρ_B – густина відходів при тій же самій температурі та при атмосферному тиску [2]; β_B – коефіцієнт об'ємного стискання відходів [2, 5]; $p_B(t)$ – поточний середній тиск у середовищі відходів, що для I-го етапу ($0 \leq t \leq t_I$) визначається за рівнянням (11), для II-го етапу ($t_I < t \leq t_{II}$) – за рівнянням (13), а для III-го етапу ($t_{II} < t \leq t_{III}$) – за рівнянням (15).

Тиск p_{II-II} на виході з прес-форми можна вважати постійним і рівним атмосферному тиску: $p_{II-II} = p_a$.

Швидкості v_{I-I} , $v_{II-II}(t)$ знаходимо, виходячи із заданої продуктивності Q зневоднення, що в свою чергу, залежить від добової маси $m_{B,д}$ відходів на підприємстві та від тривалості t_p роботи установки для зневоднення у продовж доби

$$v_{I-I} = \frac{Q}{A_{o,II} B_{II}} = \frac{m_{B,д}}{\rho_B t_p A_{o,II} B_{II}}; v_{II-II}(t) = \frac{m_{B,д}}{2 \cdot \rho_B t_p B_{II} [H_B - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}; 0 \leq t \leq t_{III}, \quad (20)$$

де $A_{o,II}$ – ширина отвору у пуансоні.

Втрати $h_{\Sigma}(t)$ знаходимо з використанням формул Дарсі та Вейсбаха [5]

$$h_{\Sigma}(t) = \frac{v_{I-I}^2}{2 \cdot g} \lambda_{B1} \frac{L_{II1}}{D_{B,r1}} + \frac{v_{II-II}(t)^2}{2 \cdot g} \left[\lambda_{B2}(t) \frac{L_{II2} - 4 \cdot L_B}{D_{B,r2}(t)} + (\zeta_{Bx} + \zeta_p + \zeta_{II} + 4 \cdot \zeta_{3B} + 4 \cdot \zeta_{поз} + \zeta_B) \right];$$

$$0 \leq t \leq t_{III}, \quad (21)$$

де L_{II1} , L_{II2} – довжини ділянок робочої поверхні пуансона, уздовж яких переміщуються відходи; L_B – довжина виступу пуансона; $D_{B,r1}$, $D_{B,r2}(t)$ – гідравлічні діаметри потоку відходів у прес-формі на ділянках довжинами L_{II1} , L_{II2} [5]; λ_{B1} , $\lambda_{B2}(t)$ – коефіцієнти гідравлічного тертя у середовищі відходів на ділянках довжинами L_{II1} , L_{II2} [5]; ζ_{Bx} , ζ_p , ζ_{II} , ζ_{3B} , $\zeta_{поз}$, ζ_B – коефіцієнти місцевих опорів [5, 7] на вході у прес-форму у перерізі I – I, на розгалуженні 6, на повороті 7, на поступовому звуженні 8 виступів 5 (з кожної сторони робочої поверхні пуансона виконані по чотири такі виступи, див. також рис. 1), на раптовому розширенні 9 за виступом 5 (по чотири раптові розширення з кожної сторони), на виході з прес-форми. Нижче наведені формули для визначення складових у рівнянні (21) [2, 5]

$$\lambda_{B1} = 0,11 \left(\frac{68}{Re_{B1}} + \frac{\Delta_{II}}{D_{B,r1}} \right); \lambda_{B2}(t) = 0,11 \left(\frac{68}{Re_{B2}(t)} + \frac{\Delta_{II}}{D_{B,r2}(t)} \right);$$

$$D_{B,r1} = \frac{4 \cdot A_{o,II} B_{II}}{2 \cdot A_{o,II} + 2 \cdot B_{II}}; D_{B,r2}(t) = \frac{4 \cdot B_{II} [H_B - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}{2 B_{II} + 2 \cdot [H_B - (z_I + z_{II}) \cos \gamma]}; \quad (22)$$

$$Re_{B1} = \frac{v_{I-I} \cdot D_{B,r1}}{v_B}; Re_{B2}(t) = \frac{v_{II-II}(t) \cdot D_{B,r2}(t)}{v_B}; 0 \leq t \leq t_{III},$$

де Re_{B1} , $Re_{B2}(t)$ – числа Рейнольдса відходів на ділянках довжинами L_{II1} , L_{II2} ; v_B – кінематична в'язкість відходів [2, 5]; Δ_{II} – середня висота мікронерівностей на внутрішніх поверхнях прес-форми та пуансона.

З використанням рівняння (17) після підстановки до нього рівнянь (18 – 22) можна знайти тиск $p_{B-I}(t)$ у будь-який момент часу циклу вібронавантаження. Знаючи $p_{B-I}(t)$, за аналогом з рівнянням (17), можна скласти рівняння для визначення тиску й у проміжних перерізах прес-форми, після кожного місцевого опору. Дані тиски додаються до тисків, розрахованих за формулами (9 – 11), (13 – 16), таким чином розраховується сумарний тиск у середовищі відходів

на кожній характерній ділянці прес форми, від якого залежить продуктивність віброударного зневоднення.

Висновки

1. Спосіб віброударного зневоднення є одним з найбільш ефективних способів утилізації відходів харчових виробництв, який забезпечує високу продуктивність робочого процесу (30 – 60 т зневоднених відходів за добу), порівняно низьку енергоємність (90 кВт·год/т), необхідну для утилізації кінцеву вологість відходів (20 – 25%) та реалізується на компактному й надійному гідроімпульсному обладнанні.

2. Для впровадження способу віброударного зневоднення на виробництві у статті запропонована схема промислової гідроімпульсної установки для його здійснення, крім цього, розглянуто механізм робочого процесу та запропоновані рівняння, що зв'язують його основні параметри й дозволяють розраховувати найбільш оптимальний режим віброударного зневоднення.

1. Іскович-Лотоцький Р. Д. Аналіз способів сепарування вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації/ Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування, 2009 – Випуск №57. – С. 50–55.
2. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография/ И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.
3. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування / Іскович-Лотоцький Р. Д. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 338 с.
4. Планирование закона торможения поршня гидроцилиндра [Електронний ресурс] Режим доступу: http://www.simumath.net/library/book.html?code=Dyn_synthesis_planning_braking_law.
5. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы/ Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
6. Гончаревич И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности/ Гончаревич И. Ф., Урьев И. Б., Талейсник М. А. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2015.

О. М. Семків¹, О. І. Сухарькова²

¹Національний університет цивільного захисту України (м. Харків)

²Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)

НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ФАЗОВИХ ТРАЄКТОРІЙ РІВНЯНЬ МАЯТНИКОВИХ КОЛИВАНЬ

Наведено графоаналітичний спосіб визначення критичних значень параметрів фазових траєкторій диференціальних рівнянь другого порядку, що базується на понятті викривленості траєкторій і враховує зміну знака їх кривини вздовж траєкторій.

Ключові слова: фазова траєкторія, критичні значення параметра, аналіз на якісному рівні, викривленість кривої, кривина кривої.

Форм. 7. Рис.8. Літ. 13.

О. М. Семкив, Е. И. Сухарькова

ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ УРАВНЕНИЙ МАЯТНИКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Приведен графоаналитический способ определения критических значений параметров фазовых траекторий дифференциальных уравнений второго порядка, который базируется на понятии искривленности траекторий и учитывает изменение знака их кривизны вдоль траекторий.

Ключевые слова: фазовая траектория, критические значения параметра, анализ на качественном уровне, искривленность кривой, кривизна кривой.

O. M. Semkiv, E. I. Sukharkova

CLOSE DETERMINATION OF CRITICAL VALUES OF PARAMETERS OF PHASE TRAJECTORIES OF EQUALIZATIONS OF PENDULUM VIBRATIONS.

A graphic analytical method over of determination of critical values of parameters of phase trajectories of differential equalizations is Brought the second order, that is based on the concept of distorted of trajectories and takes into account the change of sign of their curvature along trajectories.

Keywords: a phase trajectory, critical values of parameter, analysis at quality level, distorted of curve, curvature of curve.

Постановка проблеми. Аналіз маятникових коливань є традиційним об'єктом дослідження теоретичної механіки. Їх вивчення на якісному рівні зручно здійснювати методом фазових траєкторій. Сутність цього методу полягає у описі поведінки коливань за допомогою наочних геометричних зображень - фазових портретів [1,2, 6-9], побудованих на площині у прямокутних координатах «зміщення» і «швидкість». У описі коливального процесу може існувати принаймні один параметр, що суттєво впливатиме на характер коливань, і зміна значення якого може розмежовувати «якість» коливань. Виникає *біфуркація* - тобто зміна характеру руху коливальної системи на великому часовому інтервалі при зміні одного або декількох параметрів. Ті значення параметрів, при яких змінюються якісні або топологічні властивості руху, називаються критичними або біфуркаційними значеннями. Для практичних впроваджень необхідні інженерні способи обчислення критичних значень параметра коливань, врахування якого може або поліпшити конструкцію коливальної системи, або запобігти її аварійному стану [11,12]. Це вказує на актуальність обраної теми досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Основи пошуку критичних значень параметрів фазових траєкторій (теорії біфуркацій) закладені А. Пуанкаре й О.М. Ляпуновим, потім ці дослідження були розвинені О.О.Андроновим і учнями [1,6,9]. У роботі [3] наведено огляд різноманітних способів дослідження фазових траєкторій на якісному рівні. Але серед них виявилось лише декілька суто графічних, які спираються на геометричні інтерпретації ізоклін як розв'язків диференціальних рівнянь. Це вказує на недостатній розвиток графоаналітичних способів пошуку критичних значень параметрів фазових траєкторій для інженерної практики.

Невирішені частини проблеми. Способи пошуку критичних значень параметрів фазових траєкторій доцільно було б доповнити і такими, що базуються на характері викривленості фазової траєкторії, і які визначаються сукупністю значень її кривини вздовж цієї траєкторії.

Метою дослідження є розробка графоаналітичного способу визначення критичних значень параметрів фазових траєкторій диференціальних рівнянь другого порядку, що базується на понятті викривленості траєкторій і враховує зміну знака їх кривини вздовж траєкторій.

Основні результати досліджень. Вважатимемо, що рух точки по фазовій траєкторії здійснюється у межах, який визначається границями зміни параметра t часу, а «поворот» вправо або вліво при русі задається різними знаками при значеннях кривини цієї траєкторії.

Для пояснення суті способу спочатку замість фазових траєкторій розглянемо сім'ю кривих, для елементів якої кривину можна обчислити точно:

$$x = \sin(pt) + a \cos(t)/2; \quad y = -t \sin(t), \quad (1)$$

де параметр t змінюється у межах $t_{MIN} = -0,2\pi < t < t_{MAX} = 2,1\pi$, а керуючий параметр p змінюється у межах $p_{MIN} = 1,5 < p < p_{MAX} = 2,3$.

Необхідно визначити критичні значення параметра p , при якому елементи сім'ї кривих змінять викривленість - тобто мають змінитися на якісному рівні.

Побудуємо ряд послідовних зображень, які відповідають певним значенням параметра p (рис. 1). Аналізуючи рисунки (бажано в режимі комп'ютерної анімації) легко помітити, що сім'ю кривих можна розділити за трьома характеристиками викривленості її елементів, які будуть розмежовані двома кривими, що відповідають значенням параметрів $p=1,7$ і $p=2,15$.

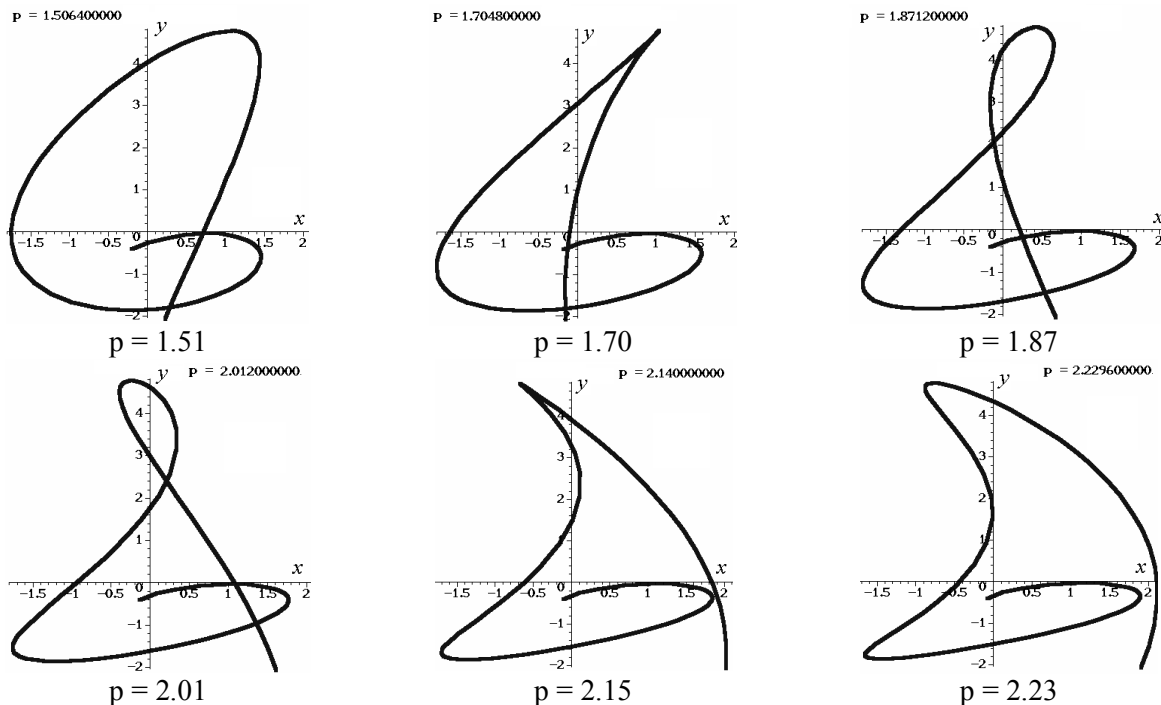


Рис. 1. Деякі зображення, що відповідають певним значенням параметра p

Пропонується спосіб визначення критичних значень керуючого параметра p , який би не спирався на анімаційні зображення елементів сім'ї кривих. Тобто спосіб розв'язання зазначеної задачі на формальному рівні.

В основу покладено дві тези.

Теза 1. Критичні значення керуючого параметра сім'ї кривих відповідають моментам зміни їх елементів на якісному рівні.

Теза 2. Якісні зміни елементів сім'ї кривих можна відслідковувати аналізуючи зміни характеру викривленості з використанням значень функцій кривини ліній.

Посилаючись на [4], обчислимо функцію кривини для сім'ї кривих (1):

$$k(p) = \frac{u(-2 \cos(t) + t \sin(t)) - v(-p^2 \sin(pt) - p \cos(t)/2)}{(u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

де $u = p \cos(pt) - p \sin(t)/2$ і $v = -\sin(t) - t \cos(t)$.

На рис. 2 наведено елемент сім'ї кривих і відповідний графік функції $k(t)$ кривини для значення параметра $p=2$ (тут графік кривини $k(t)$ обмежено прямою $k = 6$):

Далі вивчимо зміну графіка функції $k(t)$ залежно від параметра p . Для цього розглянемо графік невід'ємної частини функції $k = k(t)$ на відрізку $[1,5; 2,3]$. Криволінійна трапеція, обмежена графіком і трьома відрізками прямих (відрізок $[1,5; 2,3]$ осі p і два відрізки прямих $p = 1,5$ і $p = 2,3$), називається *підграфіком* функції $k(p)$.

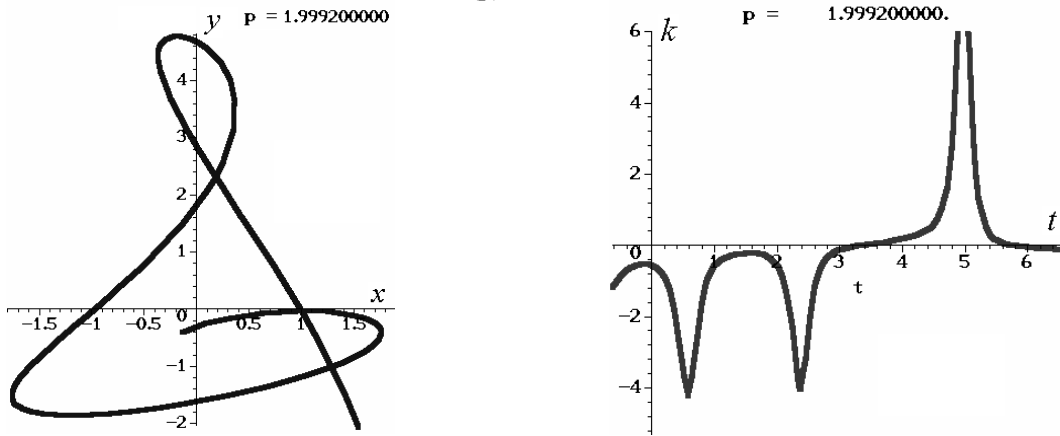


Рис. 2. Елемент сім'ї кривих і графік кривини $k(t)$ для значення параметра $p=2$

Площа підграфіка є деяке постійне число. Однак можна розглянути змінну величину – підграфік функції $k(t)$ залежно від параметра p . Тоді площа підграфіка буде не постійною, а функцією від p : $S = S(p)$.

Обчислювати площу підграфіка будемо за формулою

$$S(p) = \int_{t_1}^{t_2} F(t, p) dt, \tag{3}$$

де $F(t, p) = (k(t, p) \vee 0) \wedge k_{\max}$. Тут k_{\max} - деяке значення, що обмежує графік функції $k(t)$, \vee і \wedge - знаки R- диз'юнкції і R-кон'юнкції [5]; $t_1 = -0,2\pi$; $t_2 = 2,1\pi$.

В результаті одержимо графік функції зміни площі підграфіка $S(p)$ (рис. 3а). Його особливість полягає у тому, що у випадку зміни елементів сім'ї на якісному рівні до його складу мають залучатися лінійні елементи (пов'язані зі стрибками функції $S(p)$), розташовані паралельно осі ординат (рис. 3б). І що характерно, координати на осі абсциси цих відрізків матимуть значення, які відповідатимуть критичним значенням керуючого параметра p .

У даному випадку $p=1,7$ і $p=2,15$, що збігається з критичними значеннями параметра, одержаними «в режимі» спостережень за анімаційними зображеннями.

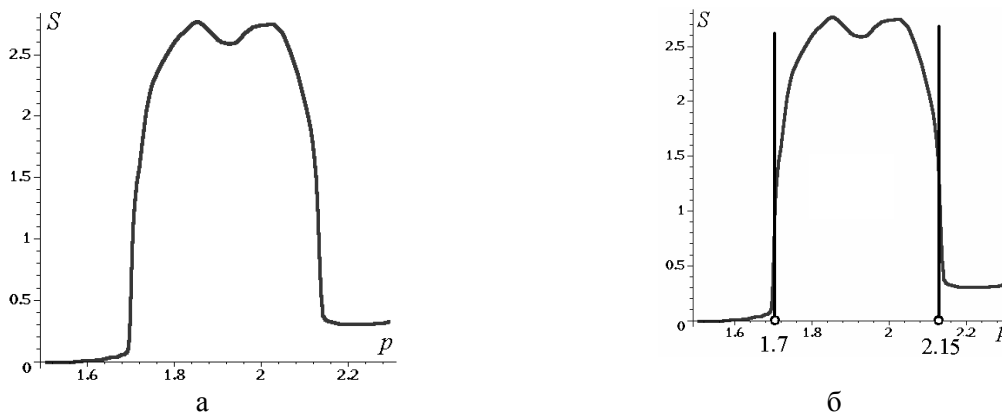


Рис. 3. Графік функції зміни площі підграфіка $S(p)$ та його особливості

Але у графіка кривини $k(t)$ існує ще і від'ємна частина, для якої також необхідно вивчити зміну графіка функції $k(t)$ залежно від параметра p . Для цього відобразимо графік кривини $k(t)$

симетрично відносно осі абсцис і також розглянемо графік невід'ємної частини функції $k = k(t)$ на відрізку [1,5; 2,3].

В результаті інтегрування за формулою (5) одержимо другий графік функції зміни площі підграфіка $S(p)$ (рис. 4а). Йому також властива зазначена вище особливість, згідно якій до його складу залучаються лінійні елементи, розташовані паралельно осі ординат (рис. 4б). І при цьому координати на осі абсциси цих відрізків матимуть значення, що також відповідатимуть критичним значенням параметра $p=1,7$ і $p=2,15$.

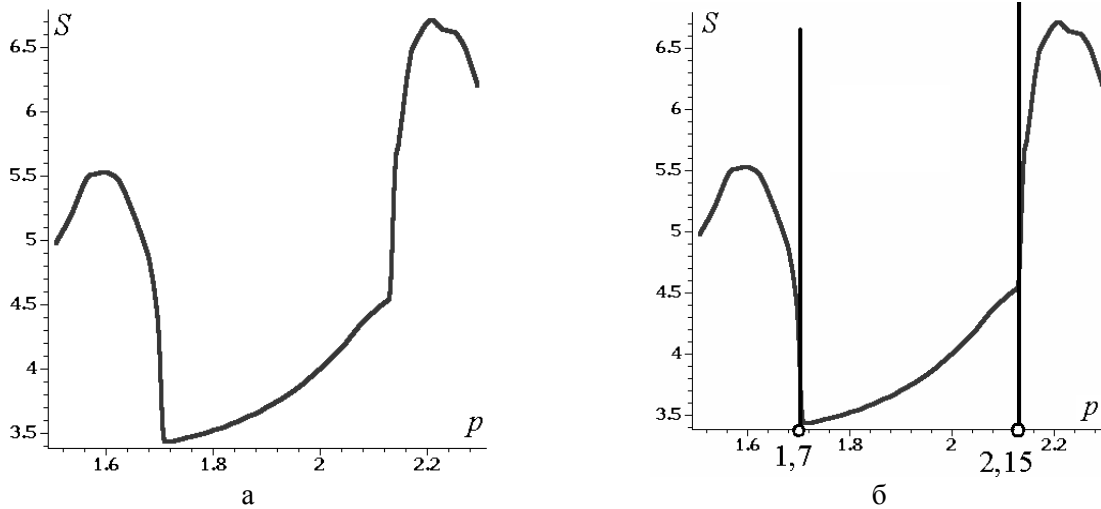


Рис. 4. Другий графік функції зміни площі підграфіка $S(p)$ та його особливості

Отже, елементи сім'ї кривих мають змінити характер викривленості при значеннях параметра $p = 1,7$ і $p = 2,15$, що збігається з результатом, одержаним вище за допомогою анімації.

Переходимо до пошуку критичних значень параметрів фазових траєкторій. При цьому головним буде питання визначення кривини фазових траєкторій, для яких у загальному випадку не відомі описи аналітичними формулами (подібними (2)). Адже координати точок на фазовій траєкторії обчислюються переважно чисельними методами. Тому постає питання визначити кривину фазової траєкторії з врахуванням «керуючого» параметра (далі позначеного як p), задану множиною N точок (x_i, y_i) коли $i = 2..M-1$.

Оберемо на фазовій кривій три сусідні точки (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) і (x_{i+1}, y_{i+1}) . Для наближеного обчислення кривини в точці (x_i, y_i) знайдемо радіус кола r_1 , яке проходить через дані три точки. Тоді значення кривини буде $k=1/r_1$.

Використаємо відоме з аналітичної геометрії рівняння кола, виражене за допомогою визначника

$$\begin{vmatrix} u^2 + v^2 & u & v & 1 \\ x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2 & x_{i-1} & y_{i-1} & 1 \\ x_i^2 + y_i^2 & x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 & x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Позначимо $A = \begin{vmatrix} x_{i-1} & y_{i-1} & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix};$

$$\begin{aligned} B &= y_{i+1}^2 y_i - x_{i+1}^2 y_{i-1} + x_{i+1}^2 y_i - y_{i+1}^2 y_{i-1} - y_i^2 y_{i+1} + y_i^2 y_{i-1} + \\ &+ x_i^2 y_{i-1} - x_i^2 y_{i+1} - y_{i-1}^2 y_i + y_{i-1}^2 y_{i+1} - x_{i-1}^2 y_i + x_{i-1}^2 y_{i+1}; \\ C &= y_{i+1}^2 x_{i-1} - y_{i+1}^2 x_i + x_{i+1}^2 x_{i-1} - x_{i+1}^2 x_i + y_i^2 x_{i+1} - y_i^2 x_{i-1} + \\ &+ x_i^2 x_{i+1} - x_i^2 x_{i-1} + y_{i-1}^2 x_i - y_{i-1}^2 x_{i+1} + x_{i-1}^2 x_i - x_{i-1}^2 x_{i+1}; \end{aligned}$$

$$D = y_{i+1}^2 x_i y_{i-1} - y_{i+1}^2 x_{i-1} y_i - x_{i+1}^2 x_{i-1} y_i + x_{i+1}^2 x_i y_{i-1} +$$

$$+ y_i^2 x_{i-1} y_{i+1} - y_i^2 x_{i+1} y_{i-1} - x_i^2 x_{i+1} y_{i-1} + x_i^2 x_{i-1} y_{i+1} -$$

$$- y_{i-1}^2 x_{i+1} y_i - y_{i-1}^2 x_i y_{i+1} - x_{i-1}^2 x_i y_{i+1} + x_{i-1}^2 x_{i+1} y_i.$$

В результаті одержимо формулу для обчислення радіуса кола

$$r_i = \frac{\sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2 - AD}}{A}, \tag{5}$$

а також координат його центра

$$x_{i0} = -\frac{B}{2A}; \quad y_{i0} = -\frac{C}{2A}. \tag{6}$$

Виходячи з формули (5) обчислимо наближене значення кривини $k_i = 1/r_i$ в точці (x_i, y_i) . Умова $A = 0$ визначатиме нульову кривину (коли точки розташовані на прямій).

Після визначення кривин для усіх точок на фазовій траєкторії будемо кусково-лінійний графік функції $k(t)$ кривин для певного значення параметра p . Площу підграфіка (для початкового значення p) визначаємо за допомогою одного з чисельних методів (наприклад, метода Сімпсона). Виконуючи зазначені дії в циклі для інших значень параметра p , одержимо наближений графік функції $S(p)$, який складатиметься з лінійних відрізків. Згідно наведеного вище, критичні значення визначатимуться за допомогою вертикальних складових кусково-лінійного графіка функції $S(p)$.

Далі розглянемо приклади дослідження залежно від початкових умов коливань математичного маятника, стан якого описано системою диференціальних рівнянь

$$\frac{d}{dt} x(t) = y(t); \quad \frac{d}{dt} y(t) = -0,2y(t) - 9.8 \sin(x(t)). \tag{7}$$

Тут $x(t)$ слід інтерпретувати як зміщення, а $y(t)$ – як швидкість маятника.

Розв'язувати систему диференціальних рівнянь (7) будемо чисельно методом Рунне-Кута-78, змінюючи при цьому початкові умови $x(0)$ і $y(0)$.

Для тестування програми (в середовищі мови Maple [13]) обрано умови $x(0)=0$ і $6 < y(0) < 8$. На рис. 5 наведено анімаційні кадри зміни фазового портрету, з яких визначаються наближені критичні значення початкової швидкості $y_1(0) = 6,65$ і $y_2(0) = 7,6$ як «керуючого» параметра p .

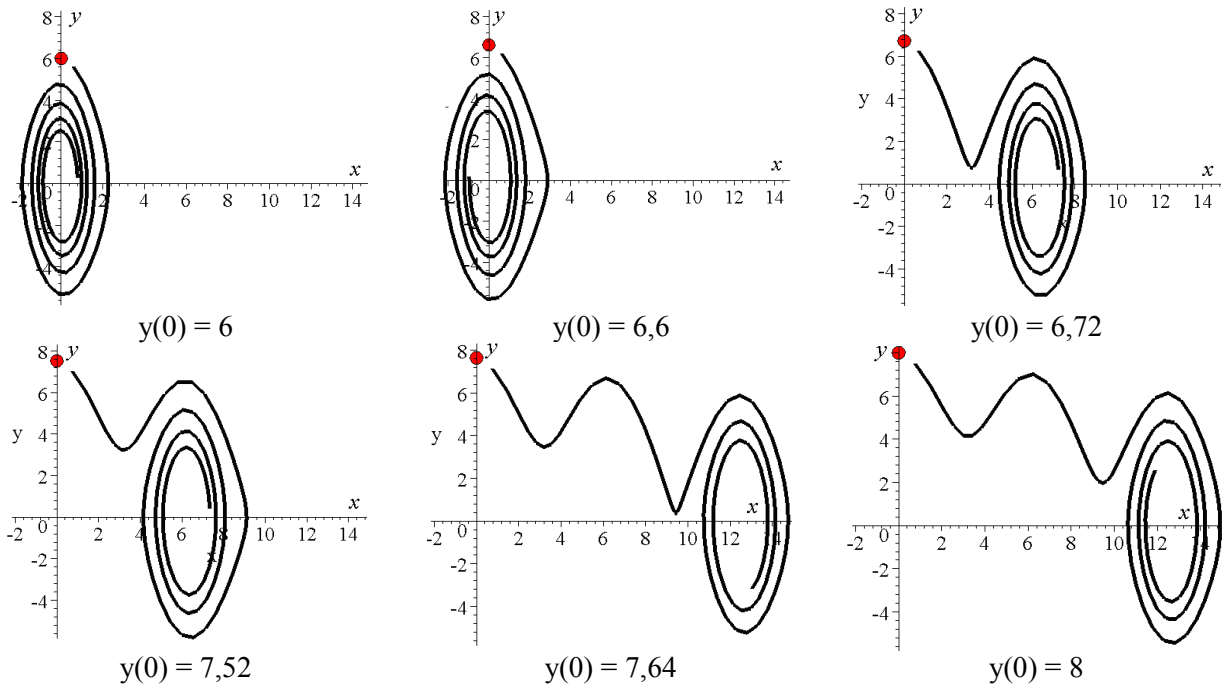


Рис. 5. Анімаційні кадри зміни фазового портрету залежно від $y(0)$

На рисунках колом позначається точка, що відповідає початковим умовам. При цьому крок між точками на фазовій кривій обирався $\Delta = 0,1$; всього кількість точок $M=1000$. На рис. 6 наведено графік відповідної функції $S(p)$ залежно від кількості ітерацій N , де критичні значення ($y_1(0) = 6,65$ і $y_2(0) = 7,6$) визначатимуться вертикальними складовими графіка функції $S(p)$. Незмінність положення точок критичних значень при $N=50$ і $N = 100$ вказує на збіжність процесу обчислень.

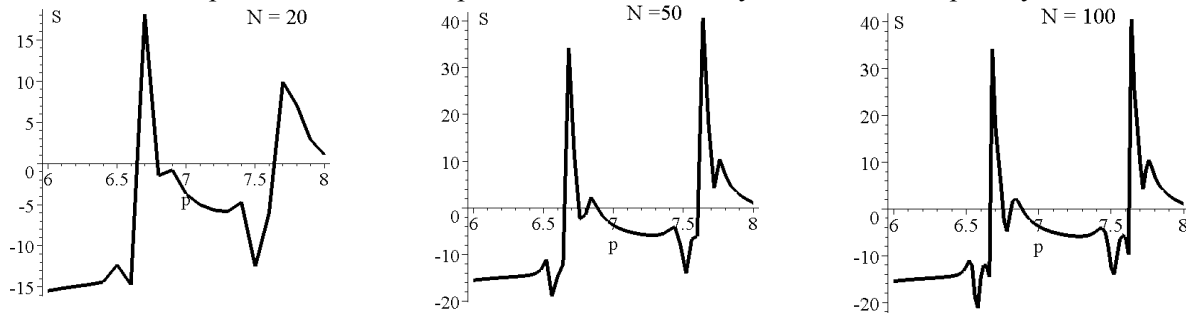


Рис. 6. Графік функції $S(p)$ залежно від кількості ітерацій N

Більш цікавим є випадок аналізу коливань за умови $0 < x(0) < 6$ і $y(0) = 8$. На рис. 7 наведено анімаційні кадри зміни фазового портрету залежно від значень $x(0)$. На рис. 8 наведено графік відповідної функції $S(p)$ зі знайденими критичними значеннями $x_1(0) = 1$, $x_2(0) = 2$ і $x_3(0) = 4,8$.

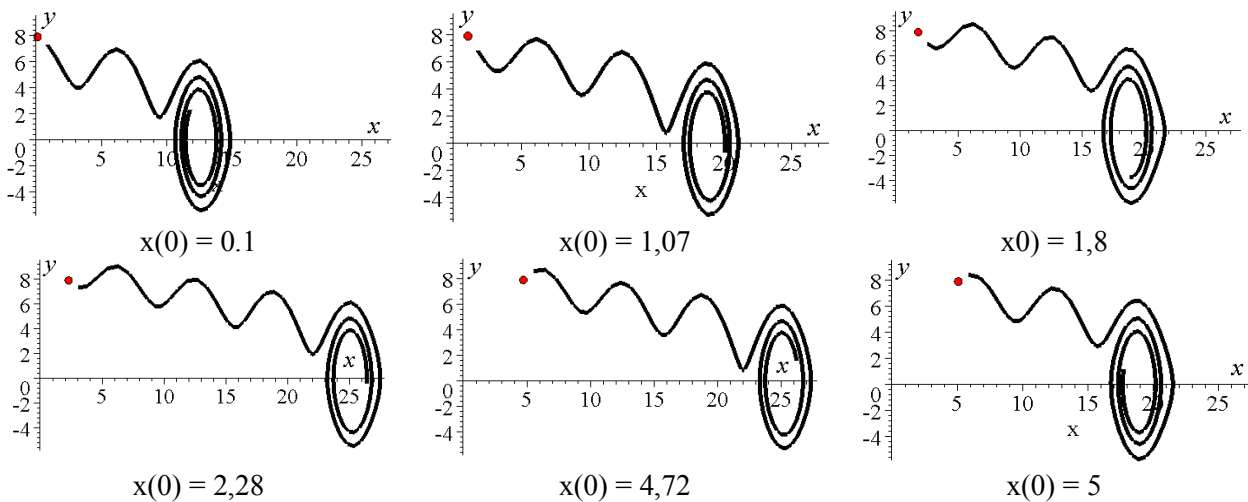


Рис. 7. Анімаційні кадри зміни фазового портрету залежно від $x(0)$

У даній роботі як міра локальної викривленості фазової траєкторії використана кривина, яка виражена через радіус кривини. Чим менше радіус кривини, тим більше вигнута лінія в даній точці. Заміна нескінченно малої дуги лінії поблизу пробної точки відповідним відрізком дотичної супроводжується нескінченно малою похибкою не нижче 2-го порядку, а заміна її відповідною дугою кола кривини - нескінченно малою похибкою не нижче 3-го порядку.

Використання способу наближеного обчислення кривини за допомогою радіуса кола, проведеного через три точки, було необхідно тому, що чисельним способом вдалося наближено обчислити лише значення функції та її похідної. А для обчислення кривини необхідно знати ще і другу похідну. Тому після аналізу поширених чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь було прийнято рішення наближено обчислювати кривини за допомогою радіуса «дотичного» кола.



Рис. 8. Графік функції $S(p)$

Розглянуті в роботі питання узгоджуються з відомою геометричною інтерпретацією другої похідної. Дійсно, існує зв'язок між другою похідною $y''(x)$ і радіусом кривини графіка функції $y = f(x)$ у відповідній його точці. Якщо радіус кривини не існує або дорівнює нескінченності, то $f''(x)$ не існує або $f''(x) = 0$ і обернено. У точці перегину лінія або не має радіуса кривини або її радіус кривини дорівнює нескінченності.

Існування неперервної другої похідної i , отже, неперервної кривини, суттєво враховується при розбивці залізничних закруглень, при будівництві автомобільних доріг, при розрахунках слаломних трас, тощо [12].

Наведений графоаналітичний спосіб визначення критичних значень параметрів фазових траєкторій диференціальних рівнянь маятникового типу дозволить розв'язувати деякі задачі якісної теорії диференціальних рівнянь. Адже мета зазначеної теорії полягає в тому, щоб, не розв'язуючи диференціальне рівняння й по можливості взагалі уникаючи обчислень, визначити ряд якісних властивостей рішень. Причому часто саме ці властивості й становлять особливий інтерес як для самої теоретичної механіки, так і для її впроваджень стосовно маятникових коливань.

Подальше ускладнення задач аналізу фазових портретів пов'язане з їхньою залежністю від параметрів, які входять до системи звичайних диференціальних рівнянь. Зокрема, при плавній зміні параметра моделі може мінятися розташування атракторів на фазовій площині, а також можуть виникати нові атрактори й припиняти своє існування старі. У першому випадку, при відсутності особливостей, буде відбуватися просте переміщення атракторів по фазовій площині (без зміни їхніх типів і кількості), а в другому - фазовий портрет динамічної системи буде докорінно перебудовуватися. Нагадаємо, що критичне сполучення параметрів, при яких фазовий портрет системи якісно міняється, називається в теорії динамічних систем точкою біфуркації.

Висновок. Для визначення критичних значень параметра p сім'ї фазових траєкторій необхідно знайти координати на осі абсцис вертикальних складових на графіку $S=S(p)$ залежності від параметра p площі підграфіка функції кривини $k(t)$ (або стрибків значень функції $S(p)$). Правило легко формалізується за допомогою «алгоритму сортування точок».

1. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – М.: Наука, 1974. – 331 с.
2. Баутин Н. Н. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости / Н. Н. Баутин, Е. А. Леонтович - М.: Наука, 1990. – 287 с.
3. Китаев Д. Б. Развитие качественной теории дифференциальных уравнений в XIX столетии: дис. канд. техн. наук: 07.00.10 / Д. Б. Китаев - М: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. – 2011. – 140 с.
4. Мищенко А. С. Сборник задач по дифференциальной геометрии и топологии / А. С. Мищенко, Ю. П. Соловьев, А. Т. Фоменко – М: Изд. ФМЛ, 2001. – 352 с.
5. Рвачёв В. Л. Геометрические приложения алгебры логики / В.Л.Рвачёв – Киев: Техніка, 1967. – 213 с.
6. Бутенин Н. В. Теория колебаний / Н. В. Бутенин – М.: Высшая школа, 1963. – 187 с.
7. Рабинович М. И. Введение в теорию колебаний и волн / М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков – М.: Наука, 1984. – 432 с.
8. Горяченко В. Д. Элементы теории колебаний. Учебное пособие / В. Д. Горяченко – Красноярск: изд-во Краснояр. ун-та, 1995. – 429 с.
9. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границы области устойчивости / Н.Н. Баутин - М.: Наука, 1984. – 176 с.
10. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний / С. П. Стрелков. – Л.: ГИТТЛ, 1950. – 344 с.
11. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство / Т. Шуп – Пер. с англ. - М.: Мир, 1982 – 238 с.
12. Бидерман В. Л. Прикладная теория механических колебаний / В. Л. Бидерман – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.
13. Betounes, D. Differential equations: theory and applications: with Maple / D.Betounes. - Hattiesburg, MS, University of Southern Mississippi, 2001. – 686 p.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2015

УДК 62.003.2

В. А. Скачков, В. И. Иванов, Т. Н. Нестеренко, О. Р. Бережная
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ АВТОКЛАВНОГО
ОТВЕРЖДЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЗАГОТОВОК

Описаны аспекты математического моделирования процесса нагрева углепластиковых заготовок при их отверждении в автоклавах аэродинамического типа. Разработан алгоритм адаптивного управления температурным режимом данного процесса для обеспечения допустимого уровня отклонений по скорости нагрева.

Ключевые слова: углепластиковая заготовка, композитный материал, автоклавное отверждение, температурный режим работы, адаптивное управление.

В. О. Скачков, В. І. Іванов, Т. М. Нестеренко, О. Р. Бережна
АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ АВТОКЛАВНОГО
ЗАТВЕРДІВАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ЗАГОТОВОК

Описано аспекти математичного моделювання процесу нагрівання вуглепластикових заготовок під час їх затвердіння в автоклавах аеродинамічного типу. Розроблено алгоритм адаптивного управління температурним режимом цього процесу для забезпечення допустимого рівня відхилень за швидкістю нагрівання.

Ключові слова: вуглепластикові заготовки, композитний матеріал, автоклавне затвердіння, температурний режим роботи, адаптивне управління.

V. Skachkov, V. Ivanov, T. Nesterenko, O. Berezhnaya
ADAPTIVE CONTROL BY TEMPERATURE CONDITION FOR AUTOCLAVE
CONSOLIDATION OF COALPLASTIC MATERIAL BLANKS

There are described the aspects of mathematical modeling of heating process for coalplastic material blank at their consolidation in the autoclaves of aerodynamic type. It is worked out the algorithm of adaptive control for the temperature condition of this process at providing of possible level of rejections on speed of heating.

Keywords: coalplastic material blank, composite material, autoclave consolidation, temperature condition of work, adaptive control.

Актуальность темы. Композиты на основе углеродных волокон и карбонизованных полимерных матриц являются самыми перспективными материалами для отраслей машиностроения, связанных с термохимическими и высокотемпературными процессами. Качественные показатели таких материалов в значительной степени определяются точным исполнением температурно-временных режимов, обеспечением заданных расходов рабочих газов и параметров давления, а также остаточного давления при вакуумировании.

Для стадии формирования углепластиковых заготовок рассмотрен комплекс расчетно-экспериментальных методов обеспечения вязкости феноло-формальдегидного связующего и его жизнеспособности [2]. Определены рациональные условия ведения процессов послойной выкладки и намотки заготовок различных геометрических размеров и толщины.

Наиболее ответственной стадией производства углепластиковых заготовок является процесс их отверждения в автоклавах аэродинамического типа, который обеспечивает удаление продуктов поликонденсации феноло-формальдегидных смол в вакуумную систему при уплотнении структуры заготовки избыточным удельным давлением до 1,20 МПа.

Данный процесс характеризуется наличием сложной комбинации тепловых и силовых факторов, таких как скорость нагрева углепластиковой заготовки на разных этапах процесса поликонденсации связующего, внешнее давление (его изменение во времени и максимальное значение), а также глубина и длительность вакуумирования зоны отверждаемого связующего [5]. Наличие значительного количества этапов данного процесса, которое усложнено существенной тепловой инерцией отверждаемой заготовки, обуславливает сложности в управлении температурно-временными режимами автоклава [1, 4].

Постановка задачи. Аэродинамический нагрев в автоклавах обеспечивает безинерционное регулирование температуры в его объеме. Однако инерционность нагрева углепластиковой заготовки с учетом тепловых эффектов при ее отверждении свидетельствует о необходимости учета предыстории изменения полей температуры в объеме автоклава для реализации заданного режима ее нагрева, а, следовательно, и о целесообразности его математического моделирования.

В связи с вышеизложенной задачей данных исследований является разработка адапционной модели процесса нагрева углепластиковых заготовок для управления

температурним режимом их автоклавного отверждения.

Основная часть. Важнейшим параметром процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок является температура в объеме заготовки, на величину которой существенное влияние оказывают температура и давление рабочего газа (азота) в автоклаве, а также процесс переноса теплоты в системе «рабочий газ–корзина–эластичная мембрана–заготовка–оправка». Температура рабочего газа, в свою очередь, зависит от мощности, подводимой к приводу роторного нагревателя автоклава, и абсолютного давления в его рабочем объеме. Система переноса теплоты в рабочем объеме автоклава характеризуется наличием значительной тепловой инерционности процесса нагрева отверждаемой заготовки. В связи с этим при построении модели процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок необходимо учитывать предысторию нагрева автоклава, текущую температуру в его рабочем объеме и ее зависимость от давления рабочего газа P в автоклаве.

Перечисленным требованиям удовлетворяет модель, представленная в виде уравнения:

$$T_{\zeta}(t) = A(P) \cdot T_a(t) + \int_0^t k(\tau - \tau_0) \cdot \frac{dT_a(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $T_{\zeta}(t)$, $T_a(t)$ – температура углепластиковой заготовки и температура в рабочем объеме автоклава на момент времени t соответственно; $A(P)$ – регрессионный коэффициент, зависящий от давления в автоклаве; $k(\tau - \tau_0)$ – функция запаздывания, учитывающая влияние предыстории режима нагрева автоклава на температуру отверждаемой заготовки.

Первый член правой части уравнения (1) определяет мгновенное влияние температуры в рабочем объеме автоклава на температуру углепластиковой заготовки, второй, интегральный член, оценивает запаздывание температуры заготовки от предыдущих этапов процесса нагрева рабочего объема автоклава.

Функция запаздывания $k(\tau - \tau_0)$ по своему физическому смыслу должна быть монотонно убывающей и при значении аргумента t , стремящегося к бесконечности, приближаться к нулю. Указанными свойствами обладают функции вида

$$k(\tau - \tau_0) = B \cdot \exp[-K \cdot (\tau - \tau_0)], \quad (2)$$

где B , K – эмпирические константы.

Исследованиями кривых распределения температуры в рабочем объеме автоклава для условий его промышленной эксплуатации установлено, что подобрать квадратурную функцию, которая бы аппроксимировала указанные кривые, практически невозможно. Наиболее простым и удобным методом представления указанных зависимостей является их линейная аппроксимация по локальным интервалам времени

$$T_a(\tau_n) = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i \cdot \tau_i), \quad (3)$$

где a_i , b_i – параметры аппроксимации; n – количество участков, на которые разделяется процесс нагрева заготовки при аппроксимации; τ_n – длительность процесса нагрева заготовки в автоклаве.

После подстановки соотношений (2) и (3) в уравнение (1) и несложных преобразований получается

$$\dot{O}_{\zeta}(t_n) = A(P) \cdot \sum_{i=1}^n (a_i + b_i \cdot \tau_i) - \frac{B(P)}{K} \cdot \sum_{i=1}^n b_i \cdot \exp[-K \cdot (t_n - \tau_i)]. \quad (4)$$

Значения параметров $A(P)$, $B(P)$ и K , входящих в уравнение (4), вычисляются с использованием регрессионных методов [5]. Для этого формула (4) расписывается по явным выражениям b_i , и получаются уравнения с неизвестными коэффициентами, включающими в свою структуру искомые параметры модели.

Так, например, для $n = 3$:

$$T_{\zeta}(t_3) = A_0 + A_1 \cdot b_1 + A_2 \cdot b_2 + A_3 \cdot (b_1 - b_2) + A_4 \cdot (b_3 - b_2), \quad (5)$$

где $A_0 = A(P) \cdot T_a(\tau)$; $A_1 = -\frac{B(P)}{K \cdot \exp(-K \cdot \tau)}$; $A_2 = \frac{B(P)}{K}$; $A_3 = \frac{B(P)}{K \cdot \exp[-K \cdot (t_3 - \tau_1)]}$;

$$A_4 = \frac{B(P)}{K \cdot \exp[-K \cdot (t_3 - \tau_2)]} .$$

Затем, используя статистические данные по режимам отверждения углепластиковых заготовок, составляется уравнение регрессии вида (5). Коэффициенты данного уравнения $A_i (i = 0, n)$ определяются методами математической статистики [5]. Используя значение указанных коэффициентов, вычисляются неизвестные параметры $A(P)$, $B(P)$ и K модели (1).

Для соотношений, входящих в уравнение (4), можно записать

$$A(P) = \frac{A_0}{T_a(t_3)} ; \tag{6}$$

$$B(P) = A_2 \cdot K ; \tag{7}$$

$$K = - \frac{\ln\left(\frac{A_4}{A_2}\right)}{t_3 - \tau_2} . \tag{8}$$

Вычисления коэффициентов аппроксимации осуществляются по формулам

$$b_0 = 0 ; \tag{9}$$

$$b_i = \frac{T_0(\tau_i) - T_a(\tau_{i-1})}{\tau_i - \tau_{i-1}} - b_{i-1} , \tag{10}$$

где $T_a(\tau_n)$ – экспериментальные значения температуры в рабочем объеме автоклава на момент времени τ_n .

Следовательно, имея результаты экспериментов по изучению процесса отверждения углепластиковых заготовок при различных значениях давления рабочего газа P в объеме автоклава и вычисляя коэффициенты модели по формулам (6)-(8), несложно получить соотношения для записи эмпирических зависимостей $A(P)$ и $B(P)$.

Энергетическое обеспечение процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок определяется как значениями подаваемого напряжения, так и силы электрического тока, подводимого к роторному нагревателю автоклава. В этой связи определение необходимого уровня мощности $W_a(\tau)$, позволяющего обеспечить в рабочем объеме автоклава заданное значение температуры $T_a(\tau)$, можно осуществлять с использованием соотношения, аналогичного уравнению (1):

$$W_a(t) = D \cdot T_a(t) + \int_0^t R(\tau - \tau_0) \frac{dT_a(\tau_0)}{d\tau_0} d\tau_0 , \tag{11}$$

где $R(\tau - \tau_0) = R \cdot \exp[-\theta \cdot (\tau - \tau_0)]$; D , R , θ – эмпирические константы.

Вычисление параметров D , R и θ уравнения (11) выполняют по методике, аналогичной определению коэффициентов $A(P)$, $B(P)$ и K уравнения (1).

Модель процесса нагрева углепластиковой заготовки (4) при отверждении предоставляет возможность нахождения температуры в рабочем объеме автоклава по заданной кривой изменения температуры заготовки. Для вычисления температуры в рабочем объеме автоклава необходимо и достаточно определить значения коэффициентов a_n и b_n (3).

Используя уравнение (4), после алгебраических преобразований можно получить соотношения для расчетов вышеуказанных коэффициентов:

$$a_n = T_a(\tau_{n-1}) - b_n \cdot \tau_{n-1} - a_{n-1} ; \tag{12}$$

$$b_n = \frac{T_\varphi(t) - A(P) \cdot \left[\sum_{i=1}^N a_i + \sum_{i=1}^N b_i \cdot \tau_n \right] - \frac{B(P)}{K} \cdot \langle b_{i-1} \cdot \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle}{A(P) \cdot \tau_n + \frac{B(P)}{K} \cdot \langle 1 - \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle} .$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (b_{i-1} - b_i) \cdot \langle \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle}{A(P) \cdot \tau_n + \frac{B(P)}{K} \cdot \langle 1 - \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle} \quad (13)$$

После определения значений коэффициентов a_n и b_n по формуле (3) определяется температура в рабочем объеме автоклава $T_a(t)$ на момент времени t_n . С использованием соотношения (11) по данной температуре вычисляют мощность $W_a(t)$, обеспечивающую температуру в рабочем объеме автоклава $T_a^p(t_n)$ и в отверждаемой заготовке $T_c^p(t_n)$.

В случае постоянства параметров, обуславливающих баланс теплоты в автоклаве, расчетная температура углепластиковой заготовки $T_c^p(t_n)$ соответствует его заданной величине. При нарушении условий баланса теплоты в рабочем объеме автоклава (например, при изменении температуры в производственном помещении или температуры подаваемого рабочего газа) происходит отклонение расчетной величины температуры углепластиковой заготовки от заданного значения:

$$\Delta T(t_n) = T_c^p(t_n) - T_c(t_n) \quad (14)$$

При превышении величины отклонения $\Delta T(t_n)$ допустимого уровня погрешности необходимо выполнить ее компенсацию. Для этого предлагается алгоритм адаптивного управления [5], который основан на уточнении значений коэффициента модели $A(P)$, величину которого вычисляют по формуле

$$A(P)|_{\tau_{n+1}} = A(P)|_{\tau_n} + \frac{\Delta T(t_n)}{T_a(t_n)} \quad (15)$$

Суть адаптивного управления заключается в том, что в память ПЭВМ вводят температурный график отверждения углепластиковой заготовки, значения температуры в производственном помещении и величину допустимого отклонения измеренной температуры заготовки от заданной величины. Далее вычисляют коэффициенты b_i^k и a_i^k , определяющие температуру в рабочем объеме автоклава $T_a^p(t)$ для k -того агрегата (при управлении работой одного автоклава $k = 1$) и необходимую мощность $W_a^k(t)$, обеспечивающую заданную температуру в рабочем объеме автоклава $T_a(t)$. Система управления работой автоклава реализует сформированный сигнал. Далее генератор опроса открывает линию контроля температуры углепластиковой заготовки в k -ом автоклаве и определяет величину отклонения $\Delta T_c(t)$. Если значение параметра $\Delta T_c(t)$ превышает допустимую величину, то выполняют адаптивное изменение параметров модели с последующим вычислением температуры в рабочем объеме автоклава, а также необходимой мощности для реализации данной температуры процесса отверждения. Таким образом, используя описанную процедуру, для всех участков времени исследуемого процесса строят полный процесс управления автоклавным отверждением.

Практическую реализацию предложенного алгоритма управления процессом нагрева углепластиковой заготовки при автоклавном отверждении, основанного на соотношениях (1)-(4), выполняли в виде программы на алгоритмическом языке TURBO PASKAL для ПЭВМ.

Начальными данными для проведения практических расчетов служат:

- давление в рабочем объеме автоклава;
- точность задания температуры углепластиковой заготовки;
- температура заготовки и температура в рабочем объеме автоклава на каждом временном участке;
- количество временных участков на графике нагрева заготовки и их длительность;
- коэффициенты модели.

Выходными параметрами программы являются:

- величина мощности, подводимой к каждому автоклаву;
- значение отклонения температуры отверждаемой заготовки от заданной величины на каждом временном интервале.

В качестве иллюстрации работы алгоритма представлены экспериментальные и расчетные кривые изменения температуры автоклава и отверждаемой углепластиковой заготовки (рис. 1). На

этом же рисунке приведено прогнозируемое отклонение температуры автоклава, от температуры, практически полученной при отверждении заготовки. Изменение внутренних или внешних факторов, которые обеспечивают соблюдение теплового баланса автоклава, приводит к необходимости коррекции модели путем уточнения значений коэффициента $A(P)$ по уравнению (1). На данном рисунке также представлена кривая изменения коэффициента $A(P)$ при нагреве автоклава. Следует отметить, что изменение значений данного коэффициента в пределах $0,1 \dots 0,8$ обеспечивает отклонение расчетной температуры автоклава от ее экспериментального значения в пределах $\pm 0,5$ °С.

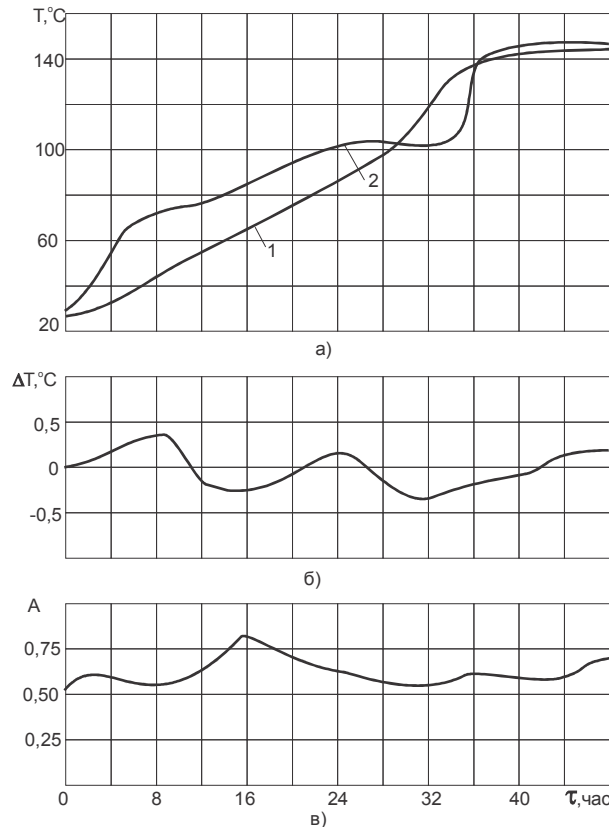


Рис. 1. Режим отверждения углепластиковой заготовки в автоклаве: 1 - заданный график нагрева заготовки; 2 - расчетный график температуры автоклава (а); отклонение реализованной температуры в объеме заготовки от заданной графиком нагрева б); изменение адаптивного коэффициента $A(P)$ модели (1) в)

Выводы. Разработана математическая модель процесса нагрева углепластиковых заготовок при их автоклавном отверждении, а также предложен алгоритм адаптивного управления указанным процессом.

1. Афанасьев Ю. А. Оптимизационные задачи в управлении технологическими процессами термообработки изделий из композитных материалов / Ю. А. Афанасьев, В. И. Муравьев // Механика композитных материалов. – 1986. – № 1. – С. 103–117.
2. Бабаевский П. Г. Отверждающиеся связующие композиционных пластиков / П. Г. Бабаевский // Пластики конструкционного назначения. – М.: Химия, 1974. – С. 75–119.
3. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
4. Иванов М. Ю. Сжатие многокомпонентной среды под влиянием внешнего переменного давления / М. Ю. Иванов, В. К. Коробов, В. М. Николаенко // Прикладная механика и математика. – 1986. – Т. 50, Вып. 4. – С. 684–688.
5. Исследование процессов отверждения углеродных композитов на основе феноло-формаль-дегидных связующих / В. А. Скачков, О. Р. Бережная, В. И. Иванов и др. // Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2006. – Вип. 14. – С. 132–138.
6. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2015.

УДК 621.01

А. М. Сліпчук

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ CAE-СИСТЕМ

Розглянуто сучасний стан CAE-систем, які зараз використовуються конструкторами на підприємствах. У статті основну увагу зосереджено на впливі шорсткості поверхні на експлуатаційні показники та на довготривалість деталі в цілому. Врахування цього параметра у майбутніх CAE-системах дасть більш точні результати життєвого циклу виробу вже на стадії технологічної підготовки машинобудівного виробництва.

Ключові слова: CAE-системи, PLM технології, концепція PLM, функціональне призначення, втомна міцність деталей, процес зношування.

А. Н. Сліпчук

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ CAE-СИСТЕМ

Рассмотрено современное состояние CAE-систем, которые сейчас используются конструкторами на предприятиях. В статье основное внимание сосредоточено на влиянии показателей шероховатости поверхности на эксплуатационные показатели и на продолжительность детали в целом. С учетом этого параметра в будущих усовершенствованных CAE-системах даст более точные результаты жизненного цикла изделия уже на стадии технологической подготовки машиностроительного производства.

Ключевые слова: CAE-системы, PLM технологии, концепция PLM, функциональное назначение, усталостная прочность деталей, процесс износа.

A. M. Slipchuk

DEVELOPMENT OF CAE-SYSTEMS IN THE FUTURE

The paper described CAE-systems, which are now used by designers in the plants. In this paper the focus concentrated on the effects of surface roughness on the performance indicators and the long-term parts in general. Requirements for surface roughness should be established based on the functional purpose surface for a given quality products. Consideration of this option in the future CAE-systems will give more accurate results of the life cycle of the product at the stage of technological preparation of production engineering. The principal feature is the ability not only to describe the structure of manufactured products, but also manufacturing technology, and more - to accumulate at these stages all the information about each production of parts and components manufactured repairs and replacements, etc.

Keywords: CAE-systems, PLM technology, the concept of PLM, functionality, fatigue strength of details, wear process.

Постановка проблеми. За останні роки у тематичній літературі по САПР все частіше використовується абревіатура PLM. Деякі постачальники рішень автоматизації інженерних процесів, в першу чергу Dassault Systems, просто використовують тільки цей термін. Проте, слід зазначити, що користувачі САПР, часом просто не знають, що саме за цим стоїть.

PLM – англійська абревіатура від Product Lifecycle Management, в перекладі «Управління життєвим циклом виробу». Таку технологію можна сприйняти як назву для комплексу програмних засобів проектування (CAD), підготовки виробництва на ЧПУ (CAM) та інженерних розрахунків (CAE), об'єднаних в єдине ціле системою управління документообігом (PDM). Всі ці компоненти - невід'ємна частина комплексу PLM, але лише частина, хоча і основна. Можна сказати, що це філософія життя виробництва. Як з'явився PLM?

Вся інформація про виріб, починаючи з креслень і закінчуючи кріпленням при складанні, до найменших дрібниць вноситься до електронної бази даних, де простежується життєвий цикл виробу й кожної деталі: де і хто виготовив, з якого металу і яким способом штампували, на яких верстатах фрезерувати і т.д. Принциповим особливістю є можливість не тільки описати структуру виробленого виробу, а й технології виготовлення, і більше того – накопичувати на наступних етапах всю інформацію про виготовлення кожної деталі і вузла, вироблених ремонтах і замінах і т.д. Інформація в достатній мірі деталізується, щоб при необхідності можна було відновити повну історію кожної деталі, виявити причини відмов і швидко внести необхідні зміни. Інформаційною базою користуються не тільки конструкторські та технологічні служби, але також служби технічної підготовки і управління виробництвом підприємства-виробника, оскільки формується повна інформаційна модель виробу, починаючи від конструкторської специфікації і закінчуючи даними про фактичне виготовлення.

Концепція PLM – це створення єдиної інформаційної бази, яка описує три головні компоненти: Продукт – Процеси – Ресурси та взаємозв'язки між ними. Наявність такої об'єднаної моделі забезпечує можливість швидко, ефективно пов'язувати всі ці три компоненти, оптимізуючи рішення під вимоги бізнесу. Робота всіх проектантів, конструкторів, технологів з єдиною моделлю забезпечує зниження витрат на численні узгодження, неминучі при традиційній технології роботи,

і виключає наявність дублюючих або взаємовиключних документів. На практиці це дозволяє значно скоротити матеріальні та часові витрати на створення продукту і запуск його у виробництво, минаючи численні налагоджувальні варіанти, що втілюються в реальності, тобто отримати проект продукту, готового буквально з перших екземплярів до відправки споживачеві.

PLM значно збільшує ефективність праці підприємства.

Отже, основне завдання PLM – це об'єднання окремих ділянок автоматизації в єдиному інформаційному просторі та реалізація наскрізного конструкторського, технологічного та комерційного циклу, від підготовки проекту до утилізації. Такий підхід обіцяє підприємствам чималі вигоди, головні з яких:

- Прискорення випуску нових продуктів;
- Посилення контролю за якістю;
- Скорочення витрат заміною фізичних макетів віртуальними;
- Економія за рахунок багаторазового використання проектних даних;
- Розширення можливостей оптимізації виробів;
- Економія завдяки скороченню відходів виробництва;
- Зниження витрат за допомогою повної інтеграції інженерного документообігу.

Проте, щоб скористатися усіма цими перевагами даної концепції, необхідно подолати серйозні технічні труднощі. Основна проблема, що стоїть перед користувачами і розробниками полягає в необхідності об'єднання різнорідних систем автоматизації на підприємстві та забезпеченні колективної роботи персоналу.

Зазвичай кожен підрозділ має своє програмне забезпечення і по-своєму її обробляє. Зокрема, відділи проектування (що використовують CAD), і аналізу продукції (CAE) можуть використовувати зовсім різні специфікації і стандарти і приймати рішення незалежно один від одного. Тому перед впровадженням PLM повинні насамперед бути встановлені корпоративні стандарти на формати даних. Наразі цю проблему можна частково вирішити шляхом застосування засобів перетворення даних з одного формату в інший, що нерідко викликає помилки і погіршує якість інформації. Найбільш очевидний спосіб уникнути цього - впроваджувати PLM-продукти одного постачальника. Однією із складових PLM-технології є CAE-система, яка безпосередньо пов'язана з CAD-системою або інколи навіть є інтегрованою у них, в цьому випадку виходять гібридні CAD / CAE-системи.

Однак лише деякі постачальники пропонують весь набір засобів PLM, та й підприємства навряд чи захочуть змінювати звичні САПР на нові. Єдиний вихід – це створення відкритого формату даних. Такий спосіб вже реалізовано, але, на жаль, з певними обмеженнями. Організація ISO випустила стандарт STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) для опису тривимірних CAD-моделей.

Невирішені проблеми. CAE (англ. Computer-aided engineering) - загальна назва для програм і програмних пакетів, призначених для вирішення різних інженерних завдань: розрахунків, аналізу та симуляції фізичних процесів, як поведе себе комп'ютерна модель виробу в реальних умовах експлуатації. Допомагають переконатися в працездатності виробу, без залучення великих витрат часу і коштів. Розрахункова частина пакетів найчастіше заснована на чисельних методах вирішення диференціальних рівнянь (метод кінцевих елементів, метод кінцевих об'ємів, метод кінцевих різниць та ін.). Засоби CAE виконують найрізноманітнішу роботу з розрахунку напружень, деформацій, теплообміну, розподілу магнітного поля, потоку рідин та інших параметрів суцільних середовищ. Наприклад, програми для кінематичних розрахунків здатні визначити траєкторії руху і швидкості ланок у механізмах. Програми динамічного аналізу можуть використовуватися для визначення навантажень і зсувів в складних складених пристроях типу автомобілів.

Тому ключовим моментом для поліпшення процесу проектування є тісна інтеграція CAD і CAE (в найкращому випадку це повинен бути продукт однієї компанії). Перетворення моделей залежить також від наявності різних властивостей у CAD-моделі. Якщо CAD-модель не містить інформацію про властивості, які необхідні для CAE, тоді проводиться визначення цих властивостей, шляхом аналізу твердотільної моделі. В іншому випадку необхідні властивості конвертуються в властивості CAE-моделі. У разі якщо властивості CAD-моделі повністю ідентичні властивостям CAE-моделі, ніякої конвертації не проводиться. Можливість тісної інтеграції залежить від наступних факторів: масштабу, меж і цілей CAE-аналізу; природи і якісних характеристик CAD-моделі; ступеня деталізації, необхідної для CAE-систем.

Існують чотири основні підходи до інтеграції CAD і CAE [6]:

- 1) CAD-орієнтований;
- 2) CAE-орієнтований;
- 3) CAD / CAE-орієнтований;
- 4) Використання технології управління інформацією про виріб протягом його життєвого циклу (Product Lifecycle Management, PLM).

Практично у всіх сучасних CAD-системах передбачені додаткові модулі аналізу та імітації, тісно інтегровані з системою моделювання. Ці модулі дозволяють вирішувати завдання кінематичного моделювання, аналізу методом скінченних елементів (МСЕ), генерації сітки і подальшої обробки безпосередньо в системі моделювання.

Таким чином МСЕ стає найбільш популярним методом для аналізу. На жаль, часто моделі створені в CAD непридатні для МСЕ. Проте, в більшості випадків необхідна якась абстрактна модель, в той час як CAD-система забезпечує створення деталізованої твердотільної моделі. Отже, для отримання МСЕ-специфічної моделі необхідний процес перетворення, який видаляє деякі елементи, і навіть змінює розміри вихідної моделі. Видалення елементів полягає в тому, що маленькі геометричні елементи, що містяться в моделі, ігноруються або не показуються.

Проте у всіх CAE-системах не враховується вплив параметрів шорсткості поверхні деталі (а таких параметрів у нашому ДСТУ є шість), залишкова напруженість, зносостійкість, особливо це важливо для тих поверхонь, які зазнають тертя.

Мета статті є направлення майбутнього розвитку CAE-систем таким чином, щоб у подальшому такі системи враховували шорсткість поверхні особливо у контактних парах, що зазнають тертя на інженерні розрахунки довготривалості та надійності машини.

Основний матеріал. Якість поверхневого шару деталей машин має істотний вплив на їх експлуатаційні властивості. Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик деталей є зносостійкість двох поверхонь тертя. Недостатня зносостійкість деталей в значній мірі визначає ресурс машин в цілому. При цьому інтенсивність зношування залежить не тільки від виду матеріалу і його механічних властивостей, але і від стану поверхневого шару деталей. Тому підвищення зносостійкості виконавчих поверхонь деталей є одним з найважливіших завдань технології машинобудування. Деталі машини переміщуються одна відносно одної, а це супроводжується тертям і зношуванням. Зносостійкість деталей визначається здатністю її поверхневого шару чинити опір руйнуванню під дією сил тертя.

Є роботи [2,4], де досліджується тільки шорсткість, яка утворюється в процесі припрацювання, і підтверджується правомірність використання терміну «рівноважна шорсткість». Дослідження зміни мікротвердості в процесі припрацювання [1-3] показали, що вона закінчується після досягнення поверхнею певною мірою наклепу.

Міцність деталей також залежить від шорсткості поверхні. Руйнування деталі, особливо при змінних навантаженнях, більшою мірою пояснюється концентрацією напружень, внаслідок наявності нерівностей. Чим менше шорсткість, тим менше можливість виникнення поверхневих тріщин від втоми металу. Обробка деталей (доведення, полірування і т. п.) забезпечує значне підвищення межі їх втомної міцності. Зменшення шорсткості поверхні значно покращує антикорозійну стійкість деталей. Це має особливо важливе значення в тому випадку, коли для поверхонь не можуть бути використані захисні покриття (поверхні циліндрів двигунів та ін.)

Шорсткість поверхні також впливає і на втомну міцність деталей. Явище втоми виникає при циклічних, тобто знакозмінних навантаженнях. Від якості обробленої поверхні в деякій мірі залежить і її корозійна стійкість. Причиною втрати працездатності багатьох деталей машин є втома матеріалу деталей. Наявність на поверхні деталі, що працює в умовах змінних навантажень, окремих дефектів і мікронерівностей, сприяє виникненню тріщин.

Довговічність деталей, що працюють в різних експлуатаційних середовищах, багато в чому залежить від їх корозійної стійкості. Корозійне руйнування деталей, як правило, починається з поверхні. У зв'язку з цим шорсткість поверхні робить істотний вплив на корозійну стійкість деталей машин. З пониженням параметра шорсткості корозійна стійкість поверхні підвищується. Речовини, що викликають корозію, осідають в западинах і заглибленнях. За наявності сил тертя процес корозії істотно зростає. Очевидно, чим менше висота нерівностей, тим повільніше буде протікати корозія. Фізико-механічні параметри якості поверхні також впливають на втомну міцність і корозійну стійкість.

У відповідальних випадках конструктор повинен обумовлювати спрямованість слідів обробки на поверхні деталі. Це може виявитися необхідним, наприклад, у зв'язку з направленням відносного ковзання сполучених деталей або з напрямком руху по деталі струменя рідини чи газу.

Вимоги до шорсткості поверхні повинні встановлюватися виходячи з функціонального призначення поверхні для забезпечення заданої якості виробів. Якщо в цьому немає необхідності, то вимоги до шорсткості поверхні не встановлюються і шорсткість цієї поверхні контролюватися не повинна. Вимоги до шорсткості поверхні не включають вимог до дефектів поверхні (раковини і пр.), тому при контролі шорсткості поверхні вплив дефектів поверхні повинно бути виключено. У деяких випадках допускається встановлювати вимоги до шорсткості окремих ділянок однієї поверхні, які можуть бути різними.

На додаток до кількісних параметрів в деяких випадках доцільно нормувати напрямки нерівностей, наприклад у зв'язку з направленням відносного переміщення поверхонь або струменя рідини, або газу відносно поверхні, а також для забезпечення необхідної вібростійкості і міцності при циклічних навантаженнях. При необхідності конструктором встановлюється також спосіб або послідовність способів отримання (обробки) поверхні, якщо вони є єдиними для забезпечення її заданої якості. При призначенні параметрів шорсткості поверхні слід перевірити можливість їх досягнення у зв'язку з раціональними методами обробки деталей.

Як правило, слід застосовувати найбільшу шорсткість, допустиму конструктивними вимогами. В іншому випадку може значно збільшитися вартість обробки, що може бути компенсовано лише підвищенням якості виробу. У деяких же випадках підвищення вимог до шорсткості може виявитися не тільки не рентабельним, але і неприпустимим. Наприклад, при занадто гладких сполучених поверхнях може виникнути явище «схоплювання», при якому частки металу відриваються від поверхневого шару поверхонь. Для таких поверхонь слід нормувати оптимальну вихідну шорсткість, яка повинна бути близькою до отриманої в процесі припрацювання

Розвинена за останні роки теорія контактування, тертя і зношування твердих тіл дозволяє встановити зв'язок між деякими параметрами шорсткості поверхні і найважливішими експлуатаційними властивостями. [2-5]

Теорія подібності і моделювання розглядається як база наукової постановки дослідів і узагальнення експериментальних даних. З аналізу диференціальних рівнянь, що характеризують загальні функціональні зв'язки між основними чинниками, та умов однозначності, що включають характеристики геометрії, фізичних властивостей і крайові умови (початкові і граничні), отримуємо передумови до експериментально-теоретичного вивчення процесів. У вирішенні поставлених завдань доводиться зустрічатися з різними за складністю явищами. У деяких випадках теоретичне вирішення завдань дозволяє отримати загальні якісні зв'язки параметрів, наприклад у визначенні коефіцієнта тертя при вирішенні контактної-гідродинамічної задачі. При аналізі ж вельми складного процесу зношування твердих тіл на даний час не вдається отримати досить загальних математичних описів явищ. [4]

Висновки. Все викладене свідчить про те, що в процесі експлуатації відбувається взаємопов'язане зміна параметрів якості поверхневого шару деталей машин і тільки технологічне забезпечення оптимального значення комплексного параметра дозволяє значною мірою підвищити їх довговічність. Все це напряму пов'язане з концепцією PLM-технологією, яка слідкує за всім періодом життя продукту - від його ідеї створення і до утилізації.

Тому я бачу у перспективі розвиток CAE-система, саме у врахуванні впливу ще більшої кількості параметрів, зокрема параметрів шорсткості, залишкових напружень після обробки та інших технологічних параметрів.

Цей параметр ще не достатньо досліджений на теоретичному рівні, тому "ввести" його у CAE-продукт буде дуже складно. Проте це значно удосконалив розрахунки тривалості роботи деталі і машини в цілому.

1. Кульгавый Э. А. Трибология характеристики и их применени е// Проблемы трибологии. – Вып.№3. – 2003. – С. 51–61.
2. Денисова Н. Е., Шорин В. А., Гонгарь И. Н., Волчихина Н. И., Шорина Н. С. Триботехническое материаловедение и трибология: учеб пособие/ Под общей редакцией Денисовой Н. Е. – Пенза: Изд-во Пенз., 2006. – 248 с.
3. Ящерицин П. И. Технологическая наследственность в машиностроении/ – Минск: Наука и техника, 1977. – 221 с.
4. Дроздов Ю. Н. Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел // Трение и износ. Т.1. - 1980. – №3. – С.417–424.
5. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах // Навчальний посібник . – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
6. <http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=9&pa=11&ar=1>

Стаття надійшла до редакції 30.03.2015.

УДК 667.64:678.026

А. В. Шарко, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Букетов*Херсонская государственная морская академия***ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время не существует общей теории взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов. Однако некоторые феноменологические предпосылки и анализ существующих экспериментальных данных могут служить базой для разработки некоторых положений такой теории на основе волновых процессов, учитывающих сложный характер взаимодействия геометрических и акустических параметров контролируемого объекта и характера возмущения.

Характер смещения дислокаций под действием переменного напряжения, создаваемого ультразвуковой волной, определяется выбором дислокационной модели. Путем решения уравнения колеблющейся струны совместно с уравнением движения упругой волны получены выражения для скорости распространения и затухания ультразвуковой волны, в зависимости от ориентации, частоты прозвучивания, плотности дислокации, средней длины дислокационной петли, вектора Бюргерса, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, плотности среды.

Ключевые слова: прочность, волновые процессы, дислокации

Рис. 1. Форм. 4. Лит. 6.

О. В. Шарко, В. Д. Нігалатій, С. О. Рожков, А. В. Букетов**ВПЛИВ ЗМІНИ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ НА АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ**

На сьогодні не існує загальної теорії взаємозв'язку міцнісних і акустичних властивостей матеріалів. Однак, деякі феноменологічні передумови та аналіз існуючих експериментальних даних можуть служити базою для розробки деяких положень такої теорії на основі хвильових процесів, що враховують складний характер взаємодії геометричних і акустичних параметрів контрольованого об'єкта і характеру збурення.

Характер зміщення дислокацій під дією змінної напруги, створюваного ультразвуковою хвилею, визначається вибором дислокаційної моделі. Шляхом рішення рівняння коливання струни спільно з рівнянням руху пружної хвилі отримано вирази для швидкості поширення й загасання ультразвукової хвилі залежно від орієнтації, частоти озвучування, щільності дислокації, середньої довжини дислокаційної петлі, вектора Бюргерса, модуля зсуву, коефіцієнта Пуассона, щільності середовища.

Ключові слова: міцність, хвильові процеси, дислокації

A. V. Scharco, V. D. Nihalatiy, S. A. Rozhkov, A. V. Buketov**THE IMPACT OF CHANGES IN DISLOCATION STRUCTURE ON THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF MATERIALS**

At present there is no general theory of the relationship of strength and acoustic properties of materials. However, some phenomenological background and analysis of existing experimental data can serve as the basis for the development of certain provisions of such a theory on the basis of wave processes, taking into account the complex interactions of geometric and acoustic parameters of the controlled object and the nature of the disturbance.

The elastic moduli to characterize the strength of interaction between neighbouring atoms in the crystal lattice and therefore electronic configurations that affect these forces. The elastic properties of metals and alloys is largely determined by the strength of interatomic bonds, which specifies the physical and technological characteristics of the alloys.

The nature of displacement of dislocations under the action of an alternating voltage generated ultrasonic wave is determined by the choice of a dislocation model. By solving the equation of a vibrating string, together with the equation of motion of the elastic wave expressions for the velocity and attenuation of ultrasonic waves, depending on the orientation, frequency of testing, dislocation density, the average length of dislocation loops, the burgers vector, the shear modulus, Poisson's ratio, density of the medium.

Key words: strength, wave processes, dislocation

Актуальность темы. Современное материаловедение – отрасль науки и техники, изучающая состав, строение, физические, химические, потребительские и технологические свойства материалов, методы их оценивания, разработку новых и усовершенствование имеющихся материалов высокого качества, технологичности, долговечности, безопасности и надежности в процессе эксплуатации. В этом разрезе актуальными направлениями исследования являются разработка методов исследования и оценивания физических, химических, технологических свойств материалов, показателей качества и потребительских свойств материалов в зависимости от назначения.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что существует ряд методов неразрушающих испытаний, позволяющих решать различные технологические задачи

производства, связанные с определением прочностных свойств выпускаемых изделий, в основе которых лежат процессы взаимодействия электромагнитных и акустических возбуждений со структурой вещества и способы определения механических свойств по характеристикам твердости [1-5]. Эти методы способны образовать при их рациональном сочетании систему определения механических свойств материалов, обладающую повышенной надежностью и экспрессивностью. Однако, если для безобразцовых и электромагнитных методов существует глубокая проработка их физических основ, то акустические методы неразрушающих испытаний прочностных свойств материалов и конструкций еще только начинают развиваться и необходимы серьезные теоретические и экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи измеряемых рабочих характеристик со структурными параметрами вещества, влияющими на прочностные свойства материалов.

Сведения об использовании акустических методов для контроля прочностных свойств малочисленны и разрознены [1-6]. Это объясняется малым эффектом изменения скорости ультразвука при изменении механических свойств и отсутствием серийно выпускаемой аппаратуры, обеспечивающей измерения с требуемой точностью.

Целью работы является исследование взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов в спектре изменения их дислокационной структуры как основы создания системы оценки структуры и механических свойств изделий.

Изложение основного материала. Для обоснования методов акустического контроля прочностных свойств материалов необходимо прежде всего выяснить механизм процессов, лежащих в основе взаимосвязи акустических и структурных параметров вещества. В основе такого рассмотрения может быть положена эволюция дислокационной структуры и связь параметров этой структуры с механическими свойствами материалов.

Обязательным условием при установлении прочностных и акустических свойств материалов является необходимость выполнения акустических измерений и механических испытаний на одних образцах, например, на образцах, предназначенных для испытаний на разрыв. Изделием такой формы и является цилиндрический резонатор.

Известно, что при падении плоской акустической волны из среды с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$ на бесконечно протяженную пластину толщиной l с волновым сопротивлением $\rho_2 c_2$ амплитуда проходящей волны зависит от частоты. Значение коэффициента прохождения равно:

$$W = \frac{2}{2 - \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda_2}\right) \left[\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right]} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda_2}\right)$$

При $\frac{2\pi l}{\lambda_2} = n\pi$ $W = 1$ амплитуда прошедшей волны максимальна. Значения частот,

удовлетворяющие этому условию $f = \frac{nc}{2l}$. При постоянных l и n , f зависит только от c_2 .

В общем случае акустические волны вследствие того, что они создаются пьезоэлементами конечных размеров, могут иметь не плоский фронт. В целом волновое поле в изделии конечных размеров произвольной формы вследствие трансформации различных типов волн при отражении носит весьма сложный характер. Сложным и является спектр собственных частот изделий.

Как известно скорость распространения ультразвука в твердых телах определяется упругими модулями и плотностью, которые в свою очередь изменяются от структуры и состояния металла, регулируемых механико-термической обработкой. Эти изменения невелики, например закалка углеродистой стали уменьшает ее модули Юнга и сдвига относительно отожженного состояния на 3...4%, плотность при термообработке изменяется на порядок меньше.

К структурным факторам, влияющим на модули упругости материала и его плотность, относятся точечные дефекты и дислокации, а также соотношения фаз в сплаве.

Колебания дислокаций приводят к изменению затухания и скорости распространения ультразвуковых колебаний.

В процессе деформации при механической или термомеханической обработке, наклепе и т.д. изменяется длина дислокационной петли L . Эффект дислокационного закрепления (уменьшение длины дислокационных петель) обычно сказывается в уменьшении дислокационного затухания и увеличении скорости распространения ультразвуковых волн. Однако, при определенных условиях скорость ультразвука может возрастать при раскреплении дислокаций или увеличении длины петель. Это так называемый аномальный эффект.

Форма дислокации при малом и большом затухании среды представлена на рис. 1.

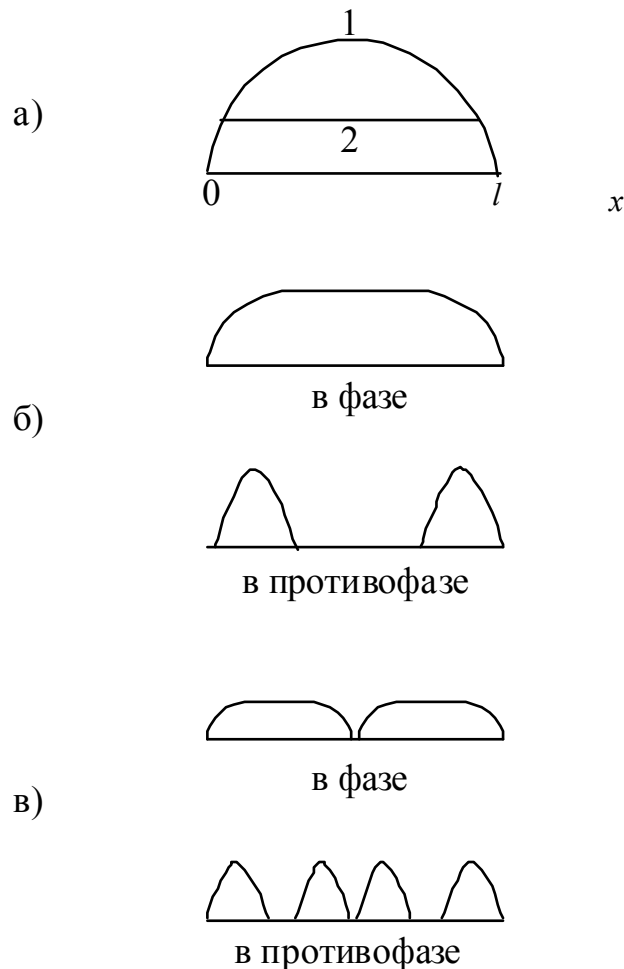


Рисунок 1 – Форма дислокации (а) при малом (1) и большом (2) затухании среды. Схема смещения дислокации под действием приложенного напряжения с двумя (б) и с тремя (в) центрами закрепления

Влияние дислокаций на модули упругости или на скорость распространения ультразвуковых колебаний качественно можно объяснить следующим образом. Дислокационная петля длиной l в момент, когда приложенное напряжение равно нулю может быть представлена прямой линией (рис. 1), лежащей вдоль оси x от $x=0$ до $x=l$. Под действием напряжения дислокационная петля изгибается между точками закрепления на концах (кривая 1 на рис. 1а). Если среда, в которой колеблется дислокационная петля, вязкая, то при движении возникает сила, стремящаяся затормозить ее. При низких частотах возбуждения ультразвуковых колебаний скорость движения дислокаций мала и поэтому торможением, вызванным вязкостью среды, можно пренебречь. Движение дислокаций в этом случае ограничивается только натяжением дислокационной линии. Форма дислокации соответствует кривой 1 на рис. 1а. При высоких частотах воздействия ультразвуковых колебаний, скорость участков дислокационной линии, удаленных от точек закрепления, велика, поэтому сила торможения, вызванного вязкостью среды играет более важную роль, чем сила натяжения. Таким образом, вязкость среды ограничивает амплитуду движения, и она получается меньшей, чем для низких частот (кривая 2 на рис. 1а). При этом дислокационная петля на большей части своей длины колеблется как жесткий стержень, за

исключением концевых точек, где смещение равно нулю. Такой же переход от кривой 1 к кривой 2 можно получить, если при фиксированной частоте ультразвуковых колебаний увеличивать длину дислокационной петли или при фиксированной частоте и постоянной длине петли увеличивать вязкость среды, например, повышая температуру.

Кривая 2 представляет собой лишь огибающую амплитуду движения во времени. Следовательно, в каждый данный момент времени форма дислокационного смещения может не совпадать с кривой 2. Это связано с тем, что фазы колебаний всех точек линии дислокации неодинаковы. Точки дислокации, находящиеся вблизи центров закрепления, имеют небольшое смещение, т.е. малую скорость, вследствие чего тормозящая сила мала. Поэтому эти точки находятся всегда в фазе с приложенным напряжением. Точки вблизи середины сегмента из-за большой вязкости тормозящей силы отстают по фазе от приложенного напряжения до $\frac{\pi}{2}$. Это

видно из рис. 1б, где представлена кривая 2, часть которой находится в фазе, а часть – в противофазе с приложенным напряжением. Если длина петли l велика, то смещение вдоль большей части будет в противофазе. Кривые, показанные на рис. 1б, схематически изображают форму дислокационного сегмента в два момента времени, отличающиеся друг от друга на четверть периода движения.

При ультразвуковых измерениях, находящаяся в противофазе и находящаяся в фазе движения, определяются отдельно. Движение, находящееся в противофазе приводит к затуханию, а находящееся в фазе – к изменению скорости распространения ультразвуковых волн. Площадь под кривой, соответствующей движению в фазе, пропорциональна неупругой деформации, обусловленной движением дислокаций. Этот вклад дислокаций в деформацию определяется выражением

$$\varepsilon_g = \frac{1}{l} \int_0^l b y'(x) dx,$$

где $y'(x)$ – действительная часть $y(x)$; b – величина вектора Бюргерса. Таким образом ε_g можно рассматривать просто как площадь под кривой действительной части дислокационного смещения. Изменение модуля упругости определяется выражением

$$\frac{M_o - M(\omega)}{M_o} = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_y},$$

где $M(\omega)$ – модуль упругости, измеренный на частоте ω ;

M_o – модуль упругости, измеренный при бесконечной частоте, т.е. чисто упругий модуль;

ε_g – дислокационный вклад в общую деформацию;

ε_y – упругая деформация.

Относительное изменение скорости ультразвуковой волны определяется выражением

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v - v(\omega)}{v_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta M}{M_o}.$$

Величина $\frac{\Delta v}{v_0}$ представляет собой уменьшение скорости ультразвуковой волны или модуля упругости.

С увеличением скорости колебаний площадь ε_g уменьшается и, следовательно, скорость ультразвука повышается, т.к. дислокация не способна больше следовать за быстрым изменением внешнего напряжения.

На рис. 1 показано, как изменяется смещение, показанное на рис. 1б при добавлении одной точки закрепления. На низких частотах при добавлении точки закрепления площадь под кривой действительной части смещения уменьшается, поэтому скорость ультразвука увеличивается, т.е.

$\frac{\Delta v}{v_0}$ уменьшается, а $v(\omega)$ увеличивается. Однако на высоких частотах добавление точки

закрепления вынуждает часть дислокации возле нового закрепления находиться в фазе с приложенным напряжением, при этом появляется находящаяся в фазе составляющая смещения,

что увеличивает площадь под кривой смещения, увеличивает $\frac{\Delta v}{v_0}$ и уменьшает скорость. В этом случае эффект невелик, так как на высоких частотах только малая часть смещения находится в фазе с внешним напряжением.

Если продолжать добавлять точки закрепления, то дислокационное смещение будет постоянно уменьшаться и в конце концов составляющие смещения становятся полностью закрепленными. Уменьшение расстояния между точками закрепления приводит к взаимодействию между ними, что и определяет обычно наблюдаемое в эксперименте изменение скорости, так как чем больше точек закрепления, тем больше сегментов, движение которых ограничено линейным натяжением.

Рассмотренные положения влияния эволюции дислокационной структуры на изменение акустических характеристик материалов могут быть положены в основу феноменологической теории взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов.

Выводы. Таким образом качественно может быть описан механизм изменения затухания и скорости распространения ультразвуковых колебаний в зависимости от частоты прозвучивания и таких факторов как плотность дислокаций, упругие модули, плотность среды, на которые влияют, например, механическая, термическая обработка и наклеп.

1. Grossman G. Quality Ladders in the Theory of Growth / G. Grossman, E. Helpman // Review of Economic Studies. – 1991. – P. 43–61.
2. Aghion P. A model of Growth Creative Destruction / P. Aghion, P. Howitt // Econometrica. – 1992. – V. 60. – P. 323–351.
3. Нонака И. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / И. Нонака, Х. Такеучи [пер. с англ.] – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». – 2011. – 384 с.
4. Dixon S., Edwards C., Palmer S. B. Recent developments in the characterisation of aluminium sheets using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) // Insight. – 2002. – V. 44, № 5. – P. 274–278.
5. Мишакин В. В., Кажяев В. В., Наумов М. Ю. Совместное использование метода ударного внедрения индентора и метода акустической анизотропии для оценки усталостной поврежденности металла // Дефектоскопия. – 2002. – № 9. – С. 39–45.
6. Mishakin V. V., Serebryany V. N. Application of the acoustoelastic effect in the precise evaluation of the plastic strain value // Acoustics Letters. – 1994. – V. 17, № 7. – P. 123–128.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2015.

УДК 681.2

П. С. Шолом, В. Т. Михалевич*Луцький національний технічний університет***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛОГІЙ**

У системах активного контролю розмірів деталей широко використовуються індуктивні вимірювальні перетворювачі. До цих засобів висуваються підвищені вимоги щодо забезпечення стабільних метрологічних характеристик. З метою оптимізації параметрів вимірювальних перетворень для аналізу інформаційних потоків може бути успішно застосовано математичне моделювання.

Ключові слова: вимірювання, перетворення, математична модель, лінеаризація, аналіз

Рис. 2. Форм. 17. Літ. 3.

П. С. Шолом, В. Т. Михалевич**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛОГИЙ**

В системах активного контроля размеров деталей широко используются индуктивные измерительные преобразователи. К этим средствам предъявляются повышенные требования по обеспечению стабильных метрологических характеристик. С целью оптимизации параметров измерительных преобразований для анализа информационных потоков может быть успешно применено математическое моделирование.

Ключевые слова: измерение; преобразование, математическая модель, линейаризация, анализ

P. S. Sholom, V. T. Mykhalevych**MATHEMATICAL MODELING OF INDUCTIVE TRANSFORMERS BY ANALOGIES
METHOD**

Inductive transducers are widely used in active control systems of details size. These tools are put forward higher requirements for stable metrological characteristics. Inductive transducers with a variable length of air gap in the core are used primarily in practical circuits.

Converters magnetic circuits design is always causes some difficulties due to the variability of their parameters, especially at the media interface with different magnetic permeability. Mathematical modeling can be successfully applied in order to optimize the measuring transformations parameters for the intermediate informative transformations analysis.

Processing modeling that taking place in the converters magnetic circuits is based on the analogies method use. Two differential equations are received by using the internal energy relationship which operates in a closed system with the action of external forces. For real structures these equations are nonlinear. The equation can be linearized and differential equations with constant coefficients can be obtained by using of mathematical tools.

Keywords: measurement, conversion, magnetic circle, interspace, mathematical model, differential equations, linearization, analysis

Постановка проблеми. Індуктивні вимірювальні перетворювачі широко використовуються у системах активного контролю розмірів деталей. До цих засобів висуваються підвищені вимоги щодо забезпечення стабільних метрологічних характеристик. У практичних схемах використовуються переважно індуктивні перетворювачі зі змінною довжиною повітряного проміжку у сердечнику.

Проектування магнітних кіл перетворювачів завжди викликає певні труднощі через непостійність їх параметрів, особливо на межі розділу середовищ з різною магнітною проникністю.

Метою дослідження є побудова математичної моделі індуктивних перетворювачів задля оптимізації параметрів вимірювальних перетворень для аналізу проміжних інформативних перетворень.

Виклад основного матеріалу дослідження. У приладах для автоматичного контролю розмірів лінійні переміщення попередньо перетворюються в електричні інформаційні сигнали, що є зручними для дистанційних вимірювань, а також для зв'язку із системами автоматичного управління технологічними процесами.

Важливість дистанційного вимірювання полягає у тому, що автоматичний контроль розмірів деталей в процесі їх оброблення вимагає побудови малогабаритних елементів – перетворювачів, які можуть бути встановлені в зоні оброблення у важкодоступних робочих зонах з метою отримання інформації про зміну розміру деталі. У практичних умовах перевага надається

контактним методам вимірювання, тобто таким, за яких у процесі вимірювання чутливий елемент перетворювача механічно контактує з поверхнею оброблення деталі.

У системах активного контролю, що служать для підвищення розмірної точності оброблення деталей на шліфувальних операціях, у якості первинних вимірювальних засобів широко використовуються механоелектричні давачі з індуктивними перетворювачами. У цих приладах використовується властивість електричної котушки змінювати свій реактивний опір від зміни деяких її параметрів, що визначають величину індуктивності L . Для отримання можливої більшої індуктивності котушка виконується з магнітопроводом з феромагнітного матеріалу (рис.1). Один з елементів магнітопроводу виконується рухомим (якір) і його положення відносно нерухомої частини магнітопроводу буде визначати величину зміни магнітного опору кола, а відповідно, і індуктивність котушки.

Зміна індуктивного опору котушки приводить до відповідної зміни її повного опору z . Таким чином, якщо ув'язати переміщення якоря з величиною δ , то, за умови $U = \text{const}$ виникає функціональна залежність між δ і електричним параметром L : $L = f(\delta)$.

Для розмірного контролю можуть використовуватись два типи перетворення: зі змінним повітряним проміжком у сердечнику (рис.1, а), і зі змінною площею повітряного проміжку (рис.1, б).

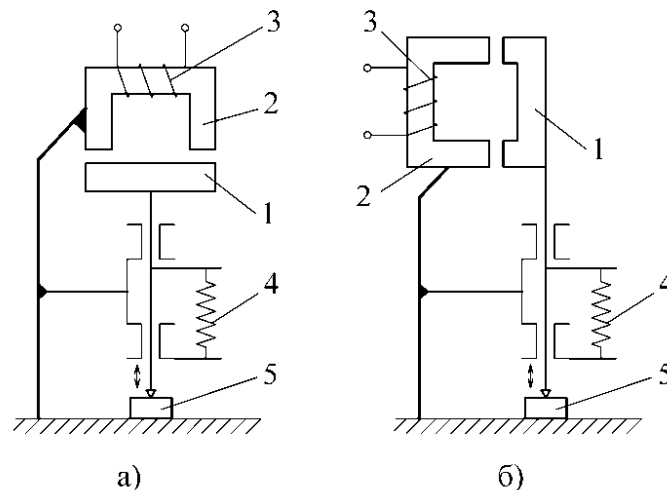


Рис. 1. Схеми індуктивних перетворювачів: а) перетворювач зі змінним проміжком; б) перетворювач зі змінною площею перекриття; 1 – якір; 2 – статор; 3 – котушка; 4 – пружина для створення вимірювального зусилля; 5 – деталь, розмір якої контролюється

Для розмірного контролю у засобах активного контролю лінійних розмірів деталей використовується схема зі змінною довжиною повітряного проміжку.

Дослідження функціонування вимірювальних перетворювачів з метою вдосконалення методу контролю, модернізації конструкції, оптимізації параметрів завжди пов'язано із побудовою моделі. Часто з цією метою створюються абстрактні (не фізичні) моделі, прикладом якої може слугувати математична модель. Математичні моделі будуються на підставі законів і закономірностей, виявлених фундаментальними науками.

Для великої групи лінійних та лінеаризованих перетворювачів і вимірювальних кіл, включно з індуктивними елементами, динамічне рівняння можна отримати, використавши метод аналогій, що є різновидом інтегральних принципів. Його застосовують, наприклад, для знаходження аналогів з метою моделювання систем різної фізичної природи електричними, складання еквівалентних схем і вирішення задач схемотехнічним методом, складання динамічних рівнянь тощо. Але кінцева мета у всіх випадках одна – отримання моделей, які описують процеси у тій чи іншій вимірювальній системі.

Метод аналогій полягає у тому, що для кіл різної фізичної природи встановлюється аналогія узагальнених параметрів: сил, координат, опорів, індуктивностей, мас і пружності, які для зручності, зводяться у таблицю. Далі вони використовуються для складання еквівалентних схем

або рівнянь шляхом застосування апробованих методів теорії електричних кіл, рівнянь Лагранжа тощо.

За такого підходу, аналоговими називаються системи різної фізичної природи, які описуються однією і тією ж системою інтегральних рівнянь. Відповідно, для встановлення аналогій параметрів і складання інтегродиференціальних рівнянь для цього кола можна використовувати будь-який підхід, наприклад, фізичні закони і структуру вимірювального кола, метод рівнозначності енергій та інші. Але тут, очевидно, можуть бути різними аналогії параметрів. Так, наприклад, на основі того, що існують паралельні і послідовні з'єднання елементів у механічних і електричних колах, то може бути, щонайменше, чотири аналогії параметрів, що називаються прямими – «послідовно-послідовно» і «паралельно-паралельно» та оберненими – «паралельно-послідовно».

Вимірювальний перетворювач і його еквівалентна схема показані на рисунку 2.

Перетворювач складається з системи механічної передачі 1 зміни розміру деталі у вигляді переміщення наконечника щупа під дією вимірювального зусилля P , магнітопроводу 2 з котушкою індуктивності L , яка через опір R_H підключена до джерела живлення U . Вихідною величиною може бути спад напруги $U_{\text{вих}}$ на опорі навантаження R_H .

На рис. 2, б подана еквівалентна схема перетворювача, де m – маса рухомих елементів перетворювача; $F = \eta P$ – сила, еквівалентна вимірювальному зусиллю P з врахуванням втрат у механізмі передачі; R_m – демпфуюча дія магнітного поля в сердечнику; X – значення повітряного проміжку; X_0 – миттєве значення повітряного проміжка; ΔD – припуск, величина якого вимірюється; D – розмір деталі.

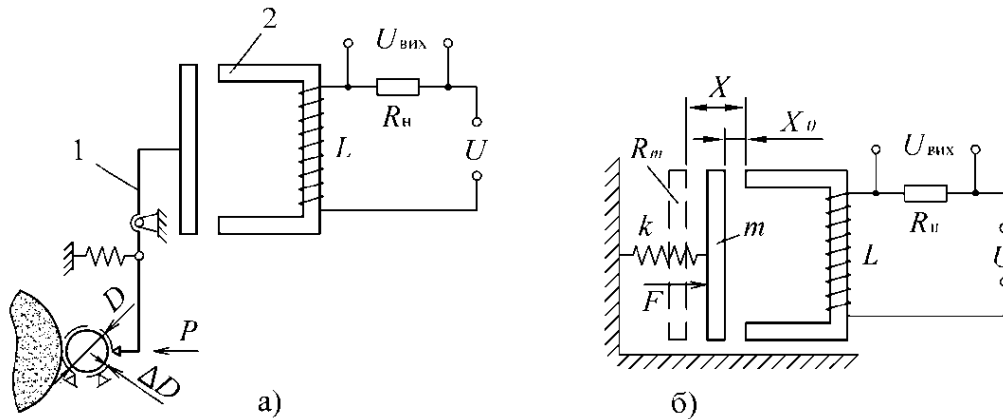


Рис. 2. Індуктивний вимірювальний перетворювач (а) і його еквівалентна схема (б)

Для механічного і електричного кола у даному випадку доцільна перша аналогія параметрів («паралельно-послідовно»). Згідно табл. 4.2 [1], узагальнені координати – переміщення X і заряд Q ; узагальнені швидкості – швидкість зміни повітряного проміжку X і струм I ; коефіцієнт інерції – маса m і індуктивність L ; узагальнені сили – сила F і напруга U ; коефіцієнт опору – параметр демпфування R_m і активний опір котушки і навантаження ($R_L + R_H$); коефіцієнт пружності – штивність пружини k .

Знехтувавши краєвим ефектом викривлення силових ліній магнітного поля та прийнявши, що основна частина опору магнітного кола припадає на повітряний проміжок і відсутнє насичення, індуктивність можна визначити як функцію повітряного проміжка й постійних параметрів:

$$L(X) = \frac{w^2 \mu_0 S_s}{2x}, \quad (1)$$

де S_s – площа поперечного перерізу сердечника.

Визначаємо енергії як квадратичні функції параметрів кіл:
кінетична енергія

$$T = \frac{mX^2}{2} + \frac{LI^2}{2}; \quad (2)$$

потенціальна енергія

$$\Pi = \frac{1}{2}kX^2; \quad (3)$$

функція Релея

$$F = \frac{1}{2}R_m X^2 + \frac{1}{2}(R_L + R_n)I^2. \quad (4)$$

Рівняння Лагранжа, що встановлює зв'язок між змінами енергії всередині системи і зовнішніми узагальненими силами, має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T'}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = F_i, \quad (5)$$

де F_i – i -та зовнішня сила, що діє на систему.

У нашому випадку для узагальнених координат X і Q , отримаємо два диференціальних рівняння:

$$mX - \frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial X} I^2 + R_m X + kX = pS; \quad (6)$$

$$\frac{d(LI)}{dt} + (R_L + R)I = U.$$

Як видно, ці рівняння нелінійні. У реальних перетворювачах проявляються невеликі відхилення в районі робочої точки X .

Отже, значення змінних X і I у відхилення від встановленого значення X_0 і I_0 при $U \neq 0$:

$$I = I_0 + i; \quad X = X_0 + x, \quad (7)$$

де i , x – зміна струму і величини повітряного проміжку від зміни вхідної величини – розміру деталі.

Значення індуктивності може бути визначене як

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S_x}{2(X_0 + x)} = L_0 \left(1 + \frac{1}{1 + (x/X_0)} \right), \quad (8)$$

де $L_0 = \frac{w^2 \mu_0 S_x}{2X}$.

Для малих значень x вираз для індуктивності можна розкласти у ряд Тейлора в районі точки X_0 або за формулою бінома Ньютона. У обох випадках отримаємо:

$$L = L_0 \left(1 - \frac{x}{2X_0} + \left(\frac{x}{2X_0} \right)^2 - \left(\frac{x}{2X_0} \right)^3 + \dots \right). \quad (9)$$

Знехтувавши значеннями членів другого та більш високих порядків малості, отримаємо:

$$L = L_0 \left(1 - \frac{x}{2X_0} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial X} = \frac{L_0}{2X_0} \left(-1 + \frac{x}{2X_0} \right). \quad (11)$$

Підставивши у (6) значення L , X та нехтуючи членами другого порядку малості (такими, як i^2 та ix), отримаємо лінеаризовані диференціальні рівняння перетворювача:

$$m\ddot{x} + R_m \dot{x} + \left(k - \frac{L_0 I_0^2}{4X_0} \right) x + \frac{L_0 I_0}{2X_0} + kX_0 = \Delta D; \quad (12)$$

$$L_0 \frac{di}{dt} + (R_L + R_n)i - \frac{L_0 I_0}{2X_0} \dot{x} + (R_L + R_n)I_0 = U. \quad (13)$$

Виключаємо із отриманих рівнянь доданки, що відповідають умовам рівноваги у робочій точці X_0 (x , i та їх похідні рівні нулю):

$$kX_0 + \frac{L_0 I_0^2}{2X_0} = 0; \quad (14)$$

$$(R_n + R_L)I_0 = U. \quad (15)$$

В кінцевому результаті отримуємо диференціальні рівняння з постійними коефіцієнтами:

$$m\ddot{x} + R_m\dot{x} + \left(k - \frac{L_0 I_0^2}{4X_0^2}\right)x + \frac{L_0 I_0}{2X_0} = \Delta D; \quad (16)$$

$$L_0 \frac{di}{dt} + (R_L + R)i - \frac{R_0 I_0}{2X_0} \dot{x} = 0. \quad (17)$$

Висновки. Отже, сприйняття вимірювальної величини, перетворення, передача і подання вимірювальної інформації в приладах реалізується на основному принципі їх функціонування – вимірювальних перетвореннях. Прилади здійснюють перетворення вхідного сигналу і встановлюють задане відношення між входом і виходом з врахуванням зовнішніх і внутрішніх параметрів. Математичні моделі є найбільш зручним і ефективним методом для опису і аналізу інформаційних потоків, пристроїв оброблення інформації, а, отже і приладів.

Моделювання процесів, що відбуваються у магнітних колах перетворювачів, виконано на основі використання методу аналогій. Використавши зв'язок внутрішньої енергії, що діє в замкнутій системі з дією зовнішніх сил, отримано два диференціальних рівняння. Для реальних конструкцій ці рівняння є нелінійними. За допомогою застосування математичного апарату рівняння можна лінеаризувати і отримати диференціальні рівняння з постійними коефіцієнтами.

1. Таланчук П. М., Рущенко В. Т. Основы теории и проектирования измерительных приборов: Учеб. пособие. – К.: Выsshак. Головное изд-во, 1989. – 454 с.
2. Основиматематичногомоделювання: Навч. посібник / А. М. Зелінський. – К.: НМК ВО, 1992. – 220 с.
3. Волосов С. С., Педь Е. И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. – М.: «Машиностроение», 1970. – 310 с.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2015.