

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Луцький національний технічний університет

**ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ**

**DOI:** <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14>

Збірник наукових праць

Випуск 14  
(червень, 2019)

Луцьк 2019

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 12 від 25 червня 2019 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:  
Серія КВ №18466-7266Р від 15.12.2011р.

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк червень 2019р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019.-164 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, особливості експлуатації та повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Адреса організаційного комітету:

Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, технологічний факультет, кафедра приладобудування.

Телефон: (0332) 26-49-43

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

© Луцький національний технічний університет, 2019 р.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

*Савчук Петро Петрович*, д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Марчук Віктор Іванович*, д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор)  
*Заблоцький Валентин Юрійович*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ  
*Шваб'юк Василь Іванович*, д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Шабайкович Віктор Антонович*, д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Григор'єва Наталія Сергіївна*, д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Ярошевич Микола Павлович*, д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Андрущак Ігор Євгенович* д.т.н., професор, Луцький НТУ  
*Пастернак Ярослав Михайлович*, д.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ  
*Скоропад Пилип Ізидорович*, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»  
*Грицай Ігор Євгенович*, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»  
*Захаров Ігор Петрович*, д.т.н., професор, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»  
*Ларшин Василь Петрович*, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет  
*Федосов Сергій Анатолійович*, д.ф.-м.н., професор СНУ імені Лесі Українки  
*Гулай Любомир Дмитрович*, д.х.н., професор СНУ імені Лесі Українки  
*Гераймчук Михайло Дем'янович*, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*Антонюк Віктор Степанович*, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*Тимчик Григорій Семенович*, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*Куц Юрій Васильович*, д.т.н. професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*Лебедев Володимир Георгійович*, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет  
*Тонконогий Володимир Михайлович*, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет  
*Коломієць Леонід Володимирович*, д.т.н., професор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості  
*Ткачук Роман Андрійович*, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Яворський Богдан Іванович*, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Ляшук Олег Леонтійович*, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Пилипець Михайло Ількович*, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Васильків Василь Васильович*, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Луців Ігор Володимирович*, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя  
*Пермяков Олександр Анатолійович*, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут»  
*Новіков Федір Васильович*, д.т.н., професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця  
*Джугурян Тигран Герасимович*, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)  
*Stanislaw Iwan*, д.т.н., професор, декан, Щецинська морська академія (Польща)  
*Mірослав Пайор*, д.т.н. професор, Західнопоморський технічний університет в м. Щецинь (Польща)  
*Zbigniew Matuszak*, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)  
*Bogusz Wisnicki*, доцент, Щецинська морська академія (Польща)  
*Marcin Szczeranek*, доцент, Щецинська морська академія (Польща)  
*Даріуш Тарнаповіч*, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)  
*Марек Опеляк*, д.т.н., ректор, Любленська політехніка (Польща)  
*Antoni Shwic*, д.т.н., професор, Любленська політехніка (Польща)  
*Гулай Ольга Іванівна*, д.п.н., доцент, Луцький НТУ  
*Лапченко Юрій Сергійович*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ  
*Денисюк Віктор Юрійович*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ  
*Оргіян Олександр Андрійович*, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет  
*Пташенчук Віталій Віталійович*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ  
*Яцинський Леонід Васильович*, к.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ  
*Луньов Сергій Валентинович*, к.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ  
*Марчук Ірина Вікторівна*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ (відповідальний секретар)

<b>ЗМІСТ</b>	
<b>Аймен Албакуш, О.А. Оргіян, Г.В. Баланюк</b> Технологічна динаміка тонкого розточування отворів малого діаметра	6
<b>Андрущенко М.І., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., асп., Капустян О.Є., к.т.н., Бриков М.М., д.т.н., Осіпов М.Ю., к.т.н.</b> Дослідження методів та приладів термометрії для визначення температури поверхонь тертя деталей під час зношування	12
<b>Бадір К.К.</b> Моделювання процесу магніто-турбулентного очищення підшипників кочення	24
<b>Банга В.І., к.т.н., Крупич О.М., к.т.н.</b> Методика експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора	31
<b>Баховський П.Ф., к.т.н., М.М. Євсюк к.т.н.</b> Дослідження процесів моделювання надання послуг за концепцією VTF	38
<b>Відринський Б. В., асп., Замурусва О.В., к.ф.-м.н.</b> Вплив легування рідкоземельними елементами (Nd, Dy, Er, Lu) на оптичні властивості кристалів $A^{IV}B^{VI}$	42
<b>O.V. Voloshko Assistant, S. P. Vysloukh Ph.D. Assoc. Prof.</b> Researching of detail's construction with method of final elemental analysis	46
<b>Галян<sup>1</sup> В.В., Іващенко<sup>2</sup> І.А, Олексюк<sup>2</sup> І.Д., Федосов<sup>1</sup> С.А., Третяк<sup>1</sup> А.П., Данилюк<sup>3</sup> І.В., Лебедь<sup>4</sup> О.О., Кевшин<sup>1</sup> А.Г., Тищенко<sup>2</sup> П.В.</b> Механізм фотолюмінесценції монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$	52
<b>Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.</b> Технічна підготовка автоматичного складання приладів	58
<b>Діхтієвський О.В., Квасніков В.П., д.т.н., Возняковський А.О., к.т.н.</b> Оцінка систематичної та випадкової складових похибки вимірювання циліндричних зубчастих коліс	62
<b>Драган А.П., Гороть Є.В.</b> Тиск колодок на гальмівний шків в колодкових і стрічково-колодкових гальмах	67
<b>Єременко В. С., Осінцева М. Б.</b> Перетворення габора в задачі аналізу нестационарних сигналів	72
<b>С.В. Луньов, Ю.А. Удовицька, М.В. Хвищун, С.А. Мороз, В.Т. Маслюк</b> Технологія одержання чутливого елемента для датчика інфрачервоного випромінювання	77
<b>V. Marchuk, S. Hryniuk, I. Marchuk, T.Dzhuhuryan</b> Simulation of dimensional accuracy in an automated grinding system of surfaces of rotation	82
<b>Махновець Г.В., м.н.с., Мирончук Г.Л., док.ф.м.н., доц., Піскач Л.В., к.х.н., доц.</b> Особливості зміни спектрального розподілу коефіцієнта поглинання кристалів $TiGaSe_2$ , легованого Cd	88
<b>Мирончук Д.Б., студент., Кот Ю.О., студент, Мирончук Г.Л. к.ф.м.н., доц., Замурусва О.В., к.ф.-м.н.</b> Вплив розмірів зерен кристалічного порошку на інтенсивність генерації другої гармоніки	94
<b>Мороз С.А. к.т.н., Пташенчук В.В. к.т.н., Приступа С.О. к.т.н., Кайдик О.Л. к.т.н.</b> Дослідження рухової активності людини для виявлення біосигналів для керування біоелектричним протезом	98
<b>Петренко О.В., Гльченко М.В.</b> Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею коріолісового вібраційного гіроскопа	103
<b>Піскач Л. В., Цісар О. В., Марушко Л. П.</b> Фазові рівноваги в системах $PbGa_2X_4-SiX_2$ (X – S, Se)	109
<b>Полянский В. И., к. т. н.</b> Условия снижения силовой напряженности механической обработки	113



УДК621.941

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-1>

Аймен Албакуш, О.А. Оргіян, Г.В. Баланюк

Одеський національний політехнічний університет

### ТЕХНОЛОГІЧНА ДИНАМІКА ТОНКОГО РОЗТОЧУВАННЯ ОТВОРІВ МАЛОГО ДІАМЕТРА

**Анотація.** У статті вивчені особливості коливань консольних борштанг малого діаметра (8 - 20 мм). Аналітично отримано умова вібросталості при заданих параметрах замкнутої на процес різання пружної системи. Експериментально визначені характеристики згинних і обертальних коливань. Показана можливість гасіння коливань при накладенні додаткових осьових вібрацій для нестійких борштанг. Вивчено спосіб розширення технологічно-динамічних можливостей нестійких консольних борштанг шляхом попереднього стиснення розточної оправки, що забезпечує підвищення згинної жорсткості.

**Ключові слова:** консольна борштанга, згинна жорсткість, обертові коливання, осьові вібрації, замкнута динамічна система.

Встановлено, що коливання при фінішному розточуванні є одним з важливих факторів, що обмежують точність обробки. Ці коливання являють собою відносні статичні і динамічні переміщення ріжучого інструменту і оброблюваної деталі, які і визначають формоутворення профілю поверхні. Таким чином, коливання, що збуджуються в пружно-дисипативній-інерційній системі (ПДІС) верстата, перешкоджають досягненню необхідних показників точності оброблених отворів. Шкідливі коливання впливають на точність обробки, відображаються на експлуатаційних характеристиках обладнання, наприклад, на продуктивності, надійності і довговічності.

Слід зазначити, що значне підвищення якості обробки було досягнуто при використанні статичних і динамічних розрахунків, а також на основі експериментальних досліджень вимушених і самозбуджуючихся коливань. Відомо, що в технологічній динаміці використовують поняття замкнутої динамічної системи верстата, що включає наявність зворотних зв'язків між ПДІС і РП (робочими процесами). Поняття замкнутості дозволяє в першу чергу вирішувати завдання стійкості динамічної системи, а також вивчати вплив ступеня стійкості на характеристики динамічної системи. Тому важливо вивчити ступінь впливу динаміки процесу розточування на точність і мінімізувати похибки при металообробці [1].

Відзначимо також, що в технологічній динаміці досліджуються і проблеми корисного використання вібрацій при різанні, особливо при використанні умов ефективного застосування вібраційного різання [2].

Динамічні системи зі змінними параметрами називають нестационарними. До нестационарності призводить, наприклад, змінність жорсткості, що призводить до віджиму різця, або нерівномірність припуску на оброблюваній деталі і ін.

Навіть простий аналіз технологічних систем показує, що збудження коливань в стаціонарних технічних системах (тобто при постійних параметрах динамічної системи) реалізується для автоколивань в нелінійних системах, а також при впливах на верстат навколишнього обладнання. Всі інші джерела збудження коливань пов'язані з перемінністю параметрів динамічної системи.

Незважаючи на широке використання консольних борштанг, а також велику кількість публікацій що до коливань і особливостей тонкого розточування, слід зазначити, що динамічні взаємодії і вібросталість процесу для борштанг з діаметром менше 15 мм вивчено явно недостатньо, хоча в багатьох деталях (в корпусах гідроапаратури, вилках, шатунах і ін.) є точні отвори малих діаметрів з відношенням  $l/d > 3x$ , де  $l$  - довжина отвору,  $d$  - діаметр. Складність обробки таких отворів полягає в конструктивних особливостях борштанг малого діаметра ( $d_6 = 8-20$  мм):

- установка віброгасників з необхідними характеристиками для гасіння коливань обмежена через конструктивні неможливості виконання достатньої порожнини під їх установку;
- мала згинальна жорсткість консольних борштанг (табл. 1).
- спільна дія згинних і обертальних коливань, що впливають на якість розточування;
- недостатня вібросталість консольних борштанг при збільшенні глибини різання.

Динамічна характеристика ПР враховує дві важливих особливості:

- інерційність процесу різання, тобто відставання по фазі сили різання від зміни товщини зрізу;

- залежність сили різання від швидкості зміни товщини зрізу.

Таблиця 1

Податливість деяких консольних борштанг		
борштанга		
d, мм	l, мм	K, мкМ / Н
15	30	0,06
	45	0,1
	60	0,21
	75	0,4
12	24	0,05
	36	0,09
	48	0,15

Запишемо диференціальне рівняння для простої одновимірної моделі:

$$T_p \dot{P} + P = -k_p \sin \varphi_u u + k_s \cos \varphi_u \dot{u}$$

де  $T_p$  - постійна часу стружкоутворення, що характеризує інерційність процесу,  $\varphi_u$  - кут, який проектує напрямок коливань на напрям головного руху [3]

$k_p$  - коефіцієнт різання,

$k_s$  - швидкісний коефіцієнт,

$\dot{P}$  - похідна сили різання по часу.

При збігу напрямків сили різання і головних осей жорсткості системи можна прийняти  $k_s = 0$ , а  $\sin \varphi_u = 1$ .

Запишемо рівняння руху замкнутої динамічної системи верстата з одним ступенем вільності:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = P \\ T_p \dot{P} + P = -k_p y \end{cases} \quad (1)$$

де  $y$  - радіальне коливальне переміщення різця щодо деталі,

$\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$  - швидкість і прискорення коливальних переміщень,

$m$  - приведена маса пружної системи,

$b$  - коефіцієнт дисипації,

$c$  - жорсткість пружної системи в напрямку головної складової сили різання,  $T_p = a/v$ ,  $a$  - товщина стружки,  $v$  - швидкість різання.

Для розрахунку критерію стійкості, використовуючи значення першої власної частоти пружної системи  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ , введемо безрозмірні параметри - безрозмірний час  $\tau = \omega_0 t$ .

Рівняння (1) представимо у вигляді

$$\begin{cases} m\omega_0^2 \ddot{y} + b\omega_0 \dot{y} + cy = P \\ T_p \omega_0 \dot{P} + P = -k_p y \end{cases} \quad (2)$$

Після перетворень і введення позначень для безрозмірних параметрів  $\Omega = \frac{b}{m\omega_0}$ , дисипація,

$\Theta = \omega_0 T_p$ , система (2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{y} + \Omega \dot{y} + y = \frac{P}{c} \\ \Theta \dot{P} + P = -k_p y \end{cases} \quad (3)$$

Від рівнянь (3) перейдемо до одного диференціального рівняння:

$$\Theta \ddot{y} + (1 + \Theta \Omega) \dot{y} + (\Theta + \Omega) y = 0, \quad (4)$$

де  $\gamma = \frac{k_p}{c}$  - коефіцієнт зв'язаності пружної системи з ПР.

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$a_0 z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3 = 0,$$

де  $a_0 = \Theta$ ;  $a_1 = 1 + \Theta\Omega$ ;  $a_2 = \Theta + \Omega$ ;  $a_3 = 1 + \gamma$ .

Відповідно до критерію Рауса - Гурвіца стійкість реалізується при:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_3 > 0 \text{ і } a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \text{ тобто}$$

$$(1 + \Theta\Omega)(\Theta + \Omega) - \Theta(1 + \gamma) > 0,$$

звідки

$$\gamma < \Omega(\Theta + \Theta^{-1} + \Omega). \quad (5)$$

позначаючи  $\Omega(\Theta + \Theta^{-1} + \Omega) = \gamma_0$  - граничне значення коефіцієнта зв'язаності пружної системи з ПР, отримаємо

$$\gamma < \gamma_0 = \Omega(\Theta + \Theta^{-1} + \Omega) \quad (6)$$

Вираз (6) дозволяє, знаючи параметри замкнутої динамічної системи, прогнозувати стійкість і працездатність інструменту при різанні.

Загальні види та схеми експериментальних стендів, зібраних на базі обробно-розточувального верстата з горизонтальними шпиндельними головками, наведені на рис. 1 і 2. Елементи стендів позначені на схемах.

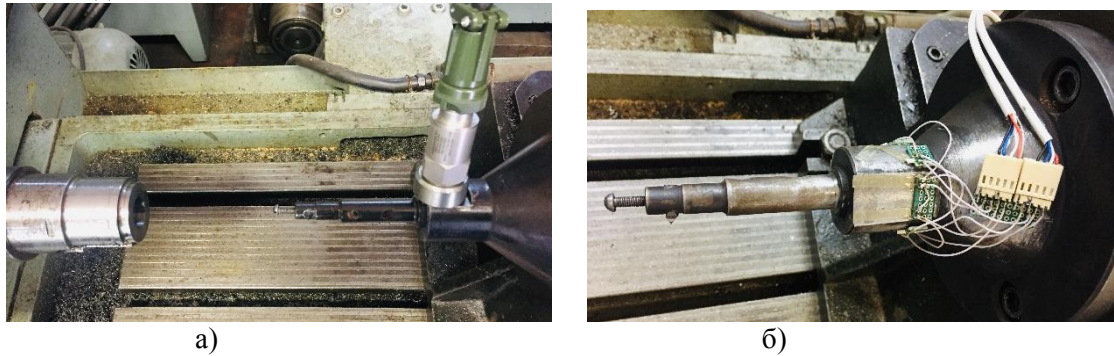


Рис. 1. Експериментальні стенди: а) з п'єзодатчиком; б) з тензодатчиками

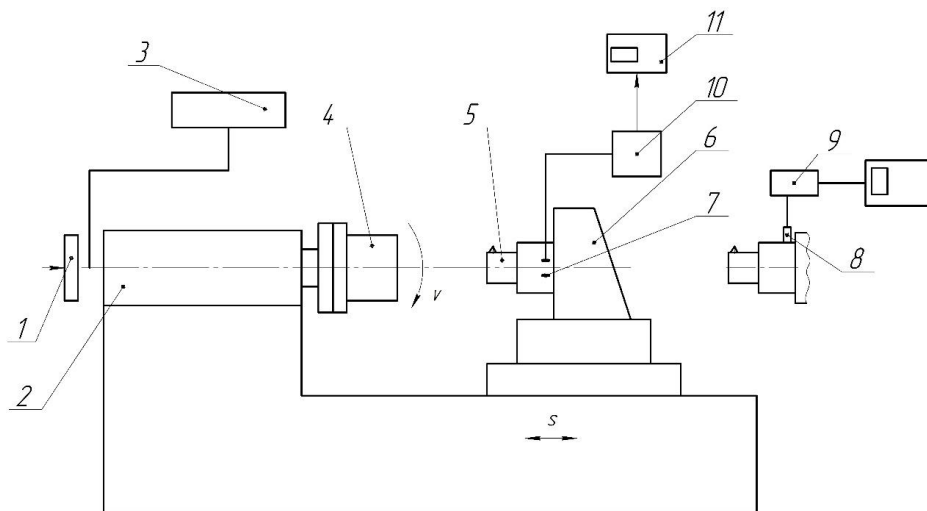


Рис. 2. Схеми експериментальних стендів для дослідження коливань борштанг:

- 1 - тахометр; 2 - шпиндельна головка; 3 - перетворювач частоти; 4 - заготовка;  
5 - борштанга; 6 - пристосування; 7 - тензорезистори; 8 - п'єзодатчик; 9 - аналізатор спектру вібрацій; 10 - пристрій реєстрації коливань; 11 - персональний комп'ютер.

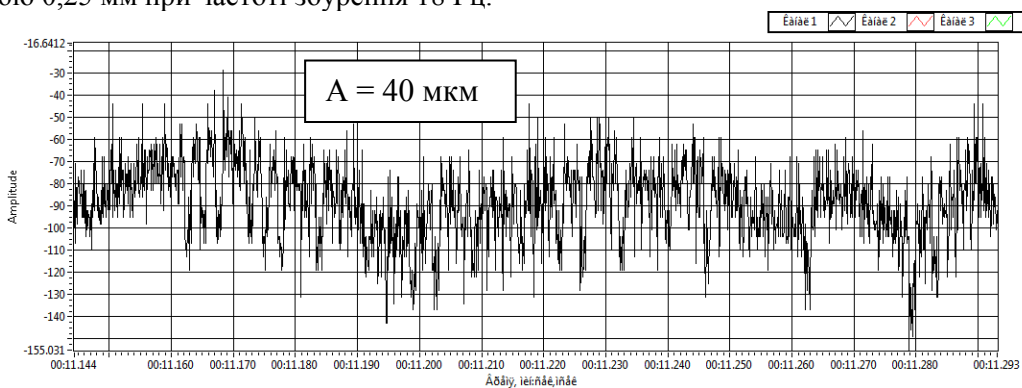
Оброблялися зразки зі сталі 45 і чавуну СЧ-18 консольними борштангами діаметрами  $d_1 = 10, 12, 15$  і  $20$  мм при  $l/d > 4$ , тобто вивчалися нестійкі режими. Частоти обертання



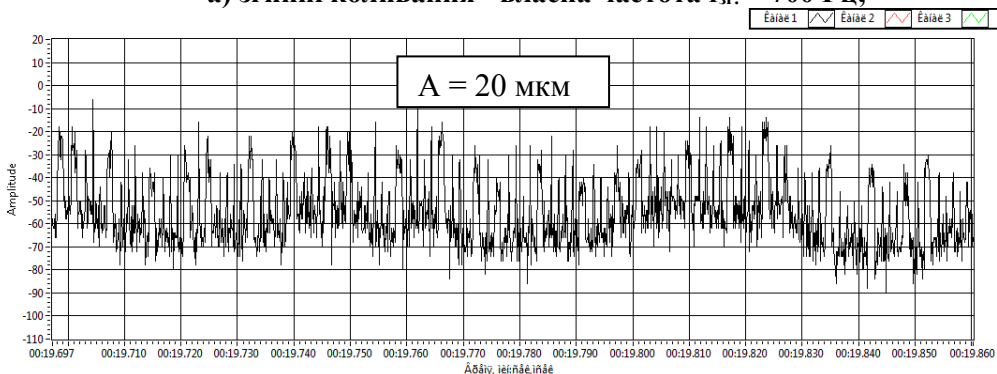
шпинделя  $f_{\text{шп}} = 16, 18, 20$  і  $25$  Гц при швидкості різання  $v = 150 - 200$  м/хв, глибинах різання  $t_p = 0,05$  і  $0,07$  мм, і подачах  $S = 28$  і  $40$  мм/хв. Вимірювалися амплітуди коливань різця  $a_y, a_z$  і  $a_o$ , викликані відповідно вигинами в горизонтальному і тангенціальному напрямках до оброблюваної деталі, і обертальні коливання.

Для амплітуд коливань виконуються співвідношення  $a_o = (0,1 - 0,6)a_y, a_z = (1,1 - 1,5)a_y$ , причому  $a_o/a_y$  значно зменшується зі збільшенням діаметра борштанги. Збільшення глибини різання  $t_p$  призводить до спільного росту всіх амплітуд. Згинні коливання розвиваються на частотах  $0,4 - 2$  кГц на діаметрах більших  $12$  мм, а на менших діаметрах з'являються високочастотні гармоніки ( $3 - 7$  кГц), відповідні власним частотам обертальних коливань.

На рис. 3 наведені осцилограми згинних і обертальних коливань, а на рис. 4 - осцилограма з використанням додаткових осьових вібрацій для дослідження можливості зменшення амплітуд згинних коливань накладенням осьових вимушених коливань з амплітудою  $0,25$  мм при частоті збурення  $18$  Гц.



а) згинні коливання - власна частота  $f_{\text{зг.}} = 700$  Гц;



б) обертальні коливання власна частота  $f_{\text{об}} = 2000$  Гц

Рис. 3. Осцилограми згинних і обертальних коливань:  $n = 980$  об/хв;  $S = 0,23$  мм/об;  $t_p = 0,05$  мм.

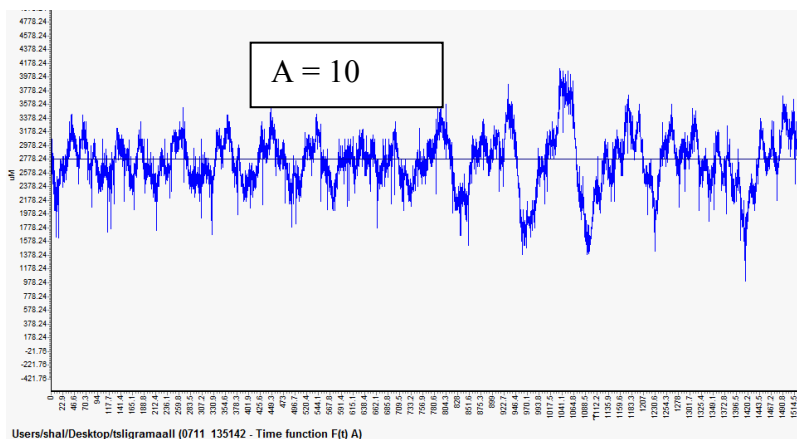


Рис. 4. Осцилограма з використанням додаткових осьових вібрацій  $l/d = 6$ :  $n = 980$  об/хв;  $S = 0,23$  мм/об;  $t_p = 0,05$  мм.

Експерименти свідчать про можливість ефективного гасіння згинних коливань нестійких борштанг з використанням додаткових осьових вібрацій.

Нами також запропонована конструктивна можливість збільшення згинної жорсткості борштанг малого діаметра шляхом попереднього стиснення таких оправок.

В експериментах, виконаних на трубах, попередньо стиснутих за допомогою вставлених у них шпильок, діаметром приблизно рівним внутрішньому діаметру труби, при різних осевих стискаючих зусиль (рис.5), були отримані значення збільшених жорсткостей.



Рис. 5. Вивчення згинної жорсткості попередньо стиснутих труб.

Шпильки загвинчують в труби за допомогою динамометричних ключів, а згинні жорсткості вимірювалися в радіальному напрямку.

На рис. 6 представлена конструкція борштанги з попереднім стисненням осевим зусиллям, а в таблиці 2 наведені значення жорсткостей.

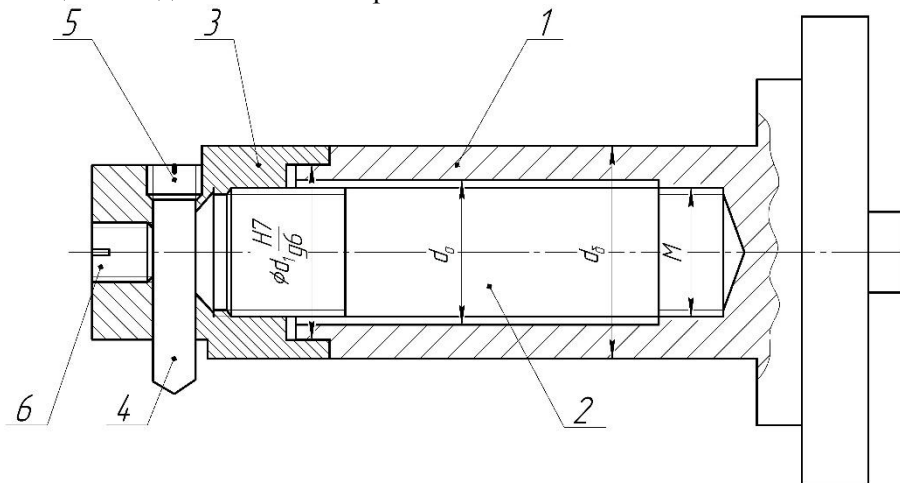


Рис.6. Конструкція борштанги з попереднім стисненням: 1 - корпус; 2 - шпилька; 3 - різцеутримувач; 4 - різець; 5, 6 - регулювальні гвинти.

Таблиця 2

Значення згинних жорсткостей борштанги при зміні значень осевих зусиль

Борштанга $d = 16\text{мм}$ , $l/d = 6$				
радіальне навантаження	без навантаження	Осьові зусилля стиснення, Н		
		4000	8000	13000
20 Н	2,5 Н / мкм	2,9 Н / мкм	3,2 Н / мкм	3,3 Н / мкм

Слід також зазначити, що збільшення сили стиснення борштанг призводить до збільшення їх жорсткості, що дозволяє збільшити довжину розточування і забезпечує зменшення амплітуд вимушених коливань в 2-3 рази.

#### Висновки:

- Консольні борштанги з діаметрами менше 20 мм мають малу вібросталість.
- Аналітично виведено умову вібросталості борштанг при заданих умовах обробки.

- Вивчено особливості вимушених коливань, наведені характеристики згинних і обертальних форм, а також їх співвідношення амплітуд і частот.
- Показана можливість гасіння згинних коливань з накладенням додаткових осьових вібрацій.
- Вивчено розширення технологічно-динамічних можливостей консольних борштанг за рахунок попереднього стиснення, що призводить до підвищення згинної жорсткості і вібросталості.

### Література

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1970. – 352 с.
3. Копелев Ю.Ф., Оргиян А.А., Кобелев В.М. Параметрические колебания металлорежущих станков. / Под общей редакцией Копелева Ю.Ф. – Одесса: Печатный дом, ОНПУ, 2007. – 352 с.
4. Оргиян А.А. Особенности колебаний борштанг для тонкого растачивания. / Оргиян А.А., Баланюк А.В. / "Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 9 – Харків : НТУ «ХП», 2014. – 323 с. – стр. 111 – 124.
5. Оргиян А.А. Анализ взаимодействия изгибных и крутильных колебаний при тонком растачивании / А.А. Оргиян, А.В. Баланюк, И.М. Творищук // Матеріали XVI МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», С 231-233, 2015 – 285 м. Одеса, 22 – 25 червня 2015 р.

**Аймен Албакуш, О.А. Оргиян, Г.В. Баланюк**

Одесский национальный политехнический университет

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ТОНКОГО РАСТАЧИВАНИЯ ОТВОРОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА

**Анотация.** В статье изучены особенности колебаний консольных борштанг малого диаметра (8 – 20 мм). Аналитически получено условие виброустойчивости при заданных параметрах замкнутой на процесс резания упругой системы. Экспериментально определены характеристики изгибных и крутильных колебаний. Показана возможность гашения колебаний при наложении дополнительных осевых вибраций для неустойчивых борштанг. Изучен способ расширения технологико-динамических возможностей неустойчивых консольных борштанг путем предварительного сжатия расточной оправки, что обеспечивает повышение изгибной жесткости.

**Aimen Albakoush, A. Orgiyan, A. Balanyuk**

Odessa National Polytechnic University

### TECHNOLOGICAL DYNAMICS OF FINE BORING HOLES OF SMALL DIAMETER

**Abstract.** The article particularly studied oscillations cantilevered boring bar of small diameter (8 - 20 mm). Analytical condition vibrostability obtained with given parameters closed on the process of cutting the elastic system. Experimentally the stands fluctuations console borshtangi studied. In the measurements of forced oscillations used piezoelectric and strain gauges. We define the value of the flexural stiffness and the natural frequencies of the console of the boring bar. In the experiments in accordance with the theory of the vibrating cutting investigated the possibility of unstable damping boring bar ( $l/d > 4$ ) using additional axial vibrations with a certain amplitude and frequency. Shows oscillograms of flexural and torsional oscillations, their frequency and amplitude. Submitted estimating the ratio of amplitudes and frequencies of the flexural and torsional oscillations. It provides a method for increasing the flexural rigidity of the boring bar. Investigated increasing the flexural rigidity of the boring bar unstable with  $l/d > 4$  by precompression of the boring bar, which increases vibration during cutting. An example of the construction of prestressed boring bar as well as the values of the flexural rigidity.

**Key words:** *cantilevered boring bar, flexural rigidity, torsional vibration, axial vibration, closed dynamic system.*

УДК 669.017:620.178.16

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-2>

Андрущенко М.І., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., асп.,  
Капустян О.Є., к.т.н., Бриков М.М., д.т.н., Осіпов М.Ю., к.т.н.  
Запорізький національний технічний університет (ЗНТУ)

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ПРИЛАДІВ ТЕРМОМЕТРІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ДЕТАЛЕЙ ПІД ЧАС ЗНОШУВАННЯ

*Показано, що одним із основних параметрів, який негативно впливає на зносостійкість і здатність до самозміцнення поверхні тертя деталей в процесі зношування, є температура. Особливо це стосується матеріалів з великою кількістю в структурі метастабільного аустеніту. В залежності від хімічного складу метастабільного аустеніту негативний вплив нагрівання поверхні тертя може позначатися вже при температурах близько 100° С. Тому для обґрунтованого вибору матеріалів для виготовлення або відновлення деталей та їх структури потрібна інформація про рівень температури, яка виникає на поверхні тертя в процесі зношування.*

*В роботі розглянуті два основні способи термометрії, які найкраще підходять для визначення температури робочих поверхонь деталей. Це контактний, за допомогою термоелектричних термометрів (термопар), та безконтактний, в якому датчиком виступає напівпровідниковий іммерсійний болометр БПІ-2, що працює в інфрачервоній частині спектру.*

*Запропоновано способи, схеми та пристосування для визначення температур робочих поверхонь скребків змішувачів вогнетривкої маси та штампів для пресування вогнетривів в виробничих умовах. А також поверхонь тертя зразків при випробуваннях на стандартній установці Х4-Б та на лабораторному стенді, розробленому в ЗНТУ.*

**Ключові слова:** зношування, температура, термометрія, термопара, лабораторні випробування, установка для випробувань, методика випробувань

**Вступ.** Відомо, що в багатьох випадках зношування деталей, в тому числі абразивне, відбувається при підвищених температурах [1, 2], які виникають, або в результаті фрикційного нагрівання, або внаслідок переробки нагрітих матеріалів. При цьому ступінь негативного впливу температури на процеси, які протікають в матеріалі під час зношування та на зносостійкість в значній мірі залежить від його структурного стану.

Ще з 60-70 років минулого століття з робіт ЗНТУ та інших наукових організацій відомо, що в умовах абразивного зношування, при температурах близьких до кімнатної, найбільша зносостійкість, як гомогенних, так і гетерогенних сплавів, досягається при наявності в металевій матриці великої кількості метастабільного аустеніту, здатного перетворюватися в мартенсит деформації в процесі зношування. Однак пізніше було встановлено, що в деяких випадках, наприклад, в умовах роботи скребків змішувачів, навіть при наявності в структурі достатньо великої кількості нестабільного аустеніту ефект підвищення зносостійкості не спостерігається. Передбачалося, що однією з причин цього можуть бути підвищені температури поверхні тертя. Але на той час достовірних відомостей відносно цього не було. Тому вивчення закономірностей впливу температури на повноту фазових перетворень, рівень самозміцнення поверхні тертя в процесі зношування та на зносостійкість було і є актуальним до цього часу. При вирішенні цієї проблеми можна виділити дві основні складові.

По-перше, необхідно знати істинну температуру поверхні тертя деталі. Для цього потрібно вивчати, аналізувати, обирати та розробляти методи оцінки температури поверхні тертя.

По-друге, потрібно фізично моделювати умови зношування при підвищених температурах як в лабораторних так і у виробничих умовах. Це буде задачею наступної роботи за даною тематикою.

**Мета даної роботи.** Дослідження методів визначення температури поверхні тертя, шляхом використання контактних та безконтактних способів; аналіз і розробка пристосувань для реалізації цих методів.

**Викладення основного матеріалу.** На першому етапі вирішення задач дослідження проблеми зношування при підвищених температурах в ЗНТУ обиралися або розроблялися способи визначення температури поверхні тертя.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., асп.,  
Капустян О.Є., к.т.н., Бриков М.М., д.т.н., Осіпов М.Ю., к.т.н.

У промисловій та науковій термометрії використовуються 2 основних методи вимірювання температури [3, 4]:

1) контактний, який реалізується первинним вимірювальним перетворювачем, що знаходиться в безпосередньому контакті з вимірювальним середовищем, яке досліджується;

2) безконтактний, який реалізується в пірометрах, а температура визначається за тепловим електромагнітним випромінюванням нагрітих тіл.

Термометри класифікують наступним чином.

Контактні:

а) термоелектричні термометри (термопари), які використовуються в діапазоні температур (від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+2200^{\circ}\text{C}$ ). Їх принцип дії ґрунтується на зміні термоелектрорушійної сили (ТЕРС) в ланцюгу при нагріванні спаю двох різнорідних металів;

б) термометри опору, в яких використовується залежність електричного опору провідників та напівпровідників від температури. Вони поділяються на:

- металеві (від  $-260^{\circ}\text{C}$  до  $+1100^{\circ}\text{C}$ );

- напівпровідникові (від  $-275^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ );

В термометрії використовується ряд інших типів контактних термометрів: розширення, манометричні та т. п. [4]. Але аналіз принципів їх роботи та конструктивних особливостей показав, що для вирішення задач поставлених в даній роботі вони практично непридатні.

Безконтактні термометри (пірометри) поділяються на:

а) квазімонохроматичні, принцип дії яких ґрунтується на залежності спектральної енергетичної яскравості від температури ( $700^{\circ}\text{C} \dots 10000^{\circ}\text{C}$ );

б) спектрального відношення. Методика вимірювання ними базується на використанні залежності відношення енергетичної яскравості в двох спектральних зонах від температури нагрітого об'єкта ( $300^{\circ}\text{C} \dots 2800^{\circ}\text{C}$ );

в) повного випромінювання. Їх дія заснована на використанні залежності температури від інтегральної енергетичної яскравості. На відміну від квазімонохроматичних, пірометри повного випромінювання вимірюють яскравість не у вузькій смужці випромінювання, а майже по всьому спектру ( $50^{\circ}\text{C} \dots 3500^{\circ}\text{C}$ ).

Вибір того чи іншого методу та приладів для вимірювання температури залежить від багатьох факторів, основними з яких є:

- прогнозовані межі температури досліджуваного об'єкту;

- необхідна точність вимірювання температури;

- склад і властивості середовища, яке досліджується.

Аналіз конструкцій, схем роботи багатьох деталей, які працюють, в основному, в умовах абразивного зношування показав, що для визначення температури їх робочих поверхонь найкраще підходять контактний спосіб за допомогою термоелектричних термометрів (термопар) та безконтактний, в якому датчиком служить напівпровідниковий імерсійний болометр, наприклад, БП1-2, який працює в інфрачервоній частині спектру.

На цей час, із багатьох способів та приладів термометрії, найбільше поширення набули термоелектричні термометри (термопари). Це пов'язано з їх широким температурним діапазоном (від  $-270^{\circ}\text{C}$  до  $+2500^{\circ}\text{C}$ ) та, зазвичай, високою точністю ( $\Delta T = 0,01\text{K}$ ), низькою ціною, взаємозамінністю і високою надійністю. Крім того, для них характерна відносно мала інерційність.

Часто потрібно знати температуру не тільки на поверхні деталі, а й характер її зміни за глибиною. В даному випадку метод виміру температури за допомогою термопари є найбільш технологічним, а в деяких випадках і єдино можливим. Тому розглянемо цей спосіб більш детально.

Найбільш проста схема термоелектричного термометру (рис. 1) включає два різнорідні провідники (термоелектроди), які з'єднані на одному кінці, утворюючи робочий (гарячий) спай. Другі кінці термопари утворюють холодний спай. Електричний струм створюється, коли температура на одному кінці (спаї), відрізняється від температури на іншому кінці. Це явище носить назву ефекту Зеебека, який є основою для вимірювання температури за допомогою термопар. Холодні кінці з'єднані із приладом для вимірювання напруги за допомогою проводів з металу одного типу, наприклад, міді.

На вимірювальний елемент з гарячим спаєм впливає температура технологічного процесу. Холодний або опорний спай це точка підключення поза технологічним процесом, де

температура відома і де вимірюється напруга.

Відповідно до ефекту Зеебека, напруга, яка вимірюється на холодному спаї пропорційна різниці температур гарячого і холодного спаїв. Ця напруга може називатися напругою Зеебека, термоелектричною напругою, або термоелектричною електрорушійною силою. У міру зростання температури гарячого спаю напруга, яка спостерігається на холодному спаї, також зростає нелінійно в залежності від зростання температури. Лінійність кривої «температура-напруга» залежить від поєднання металів, які утворюють термопару [5].

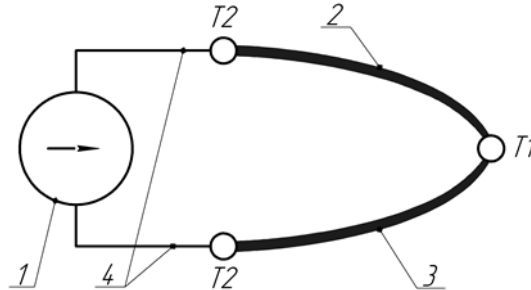


Рис. 1. Схема термоелектричного термометра

1 – вимірювальний прилад; 2, 3 – термоелектроди; 4 – з'єднувальні дроти;  
T1, T2 гарячий і холодний спай відповідно

У точках T2 підключення провідників термопари до вимірювальної системи, наведений на схемі (див. рис. 1), виникають додаткові ТЕРС. У результаті їхньої дії на вхід вимірювальної системи фактично надходить сума сигналів від робочої термопари та від «термопар», які виникли в точках підключення. Це призводить до виникнення похибок при вимірюванні температури. Для правильного вимірювання температури на одному (першому) із спаїв, необхідно підтримувати інший (другий) спай при відомій постійній температурі, щоб вимірювана ЕРС виявлялася функцією температури робочого спаю. З метою підтримки в термовимірювальному контурі умов, при яких «паразитний» вплив ЕРС холодного спаю було б виключено, необхідно постійно компенсувати напругу, яка на ньому виникає. Найбільш поширеними способами компенсації є використання схем, наведених на рисунку 2 [6].

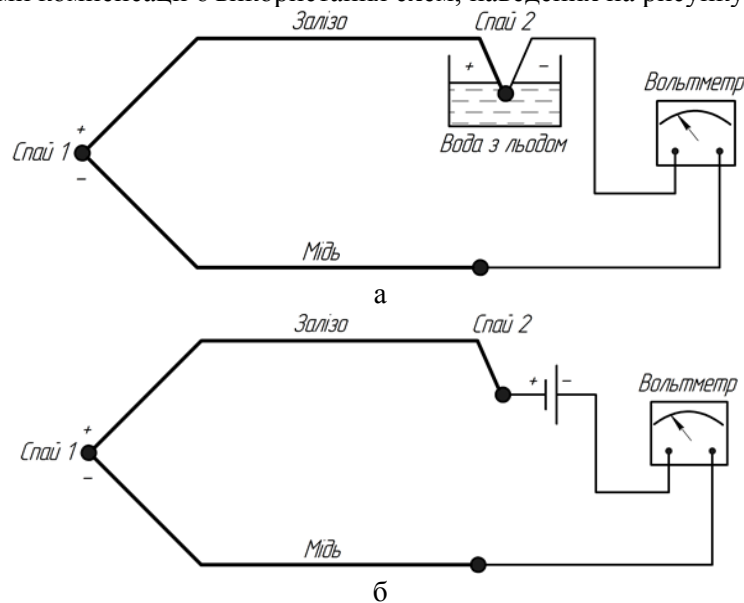


Рис. 2. Схеми підключення термопари з компенсацією дії холодного спаю шляхом його розміщення у ємності з водою і льодом (а) та з приєднанням до вимірювального контуру джерела додаткової напруги (б)

За першим способом, з метою досягнення стабільних умов роботи термоелектричного термометра необхідно помістити другий спай, тобто місце його приєднання з дротами, які з'єднують термоелектроди з вимірювальним приладом в ємність заповнену водою, в якій плаває лід (див. рис. 2 а). Таким чином на другому спаї буде триматися постійна температура

танення льоду, що виключить утворення похибки при вимірювання ТЕРС.

Але часто термопары застосовуються в мобільних портативних приладах, в яких задіяння першого способу компенсації практично неможливо. В таких випадках послідовно приєднується до вимірювального контуру джерело додаткової напруги (див. рис. 2 б), ЕРС якого матиме протилежний напрямок і за величиною буде завжди точно дорівнювати ЕРС «холодного спаю».

Важливою складовою розробки методики вимірювання температури є технологія виготовлення термопар. Утворення робочого кінця (з'єднання дротів) може виконуватися різними способами, включаючи скручування, стиснення, пайку, в тому числі й високотемпературну, а також різні види зварювання, наприклад, зварювання вузьким швом або зварювання в стик. Щоб отримати найкращі робочі характеристики, гарячий спай повинен бути механічно міцним, електрично безперервним, не забруднений ніякими хімічними домішками матеріалів, які використовуються при зварюванні або паянні. Необхідно відзначити, що гарячий спай отриманий шляхом скручування дротів, дуже швидко втрачає свої властивості, і використовувати такий спосіб отримання робочого кінця не рекомендується. З нашого досвіду, найбільш технологічним і надійним способом отримання робочого спаю термопар є зварювання кінців термоелектродів в порошкоподібному графіті, який знаходиться в металевій ємності. Напруга від трансформатора створюється між корпусом ємності та скрученими кінцями термопар, які занурюються в графіт. При плавному вийманні термопары із графіту збуджується дуга і утворюється робочий спай.

Існує дуже велика кількість типів термопар, вибір яких залежить від декількох факторів наведених вище. Досвід ЗНТУ у використанні термометрії при дослідженні процесів зношування деталей та зразків показує, що найбільш прийнятними для замірів температури поверхні тертя можна вважати термопары:

- тип Е (хромель-константан), використовується для вимірювання температур в діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+900^{\circ}\text{C}$ . Має високу чутливість;
- тип К (хромель-алюмель), використовується для вимірювання температур в діапазоні від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$  (рекомендована межа, залежить від діаметра термоелектродного дроту);
- тип L (хромель-копель), використовується для вимірювання температур в діапазоні від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+800^{\circ}\text{C}$  (рекомендована межа, що залежить від діаметра термоелектродного дроту).

В якості прикладу використання термопар можна розглянути методику виміру температур поверхні тертя скребків обладнання для змішування абразивних мас, яка була розроблена в ЗНТУ. Необхідно було встановити максимальну температуру, яка виникає на зношуваній поверхні скребка, а також характер розподілу температури по глибині поверхневого шару.

З цією метою, на підприємстві по виготовленню вогнетривів, були випробувані збірні скребки (рис. 3), в робочу кромку яких виводились шість хромель-копелевих термопар; їх робочі спаї розташовувались на різній відстані від зношеної поверхні скребка (рис. 4). Вільні кінці термопар за допомогою компенсаційних дротів через щитковий перемикач, який виключає появи різного роду перешкод і наведень в процесі роботи, були виведені на лабораторний компенсаційний прилад ЛКС4-003. Реєстрацію температури проводили в процесі промислової експлуатації змішувача при встановленому на підприємстві ритмі перемішування вогнетривкої сировини.

В результаті досліджень характеру зношування в умовах експлуатації скребків було встановлено, що їх поверхні тертя нагріваються до  $500^{\circ}\text{C} \dots 550^{\circ}\text{C}$ . При цьому, не дивлячись на те, що температура при віддаленні від поверхні скребка різко знижується (рис. 5), перетворення метастабільного аустеніту в мартенсит деформації й самозміцнення поверхні тертя не відбуваються. Отримані результати допомогли обґрунтовано вибрати інші матеріали для наплавлення скребків, ніж ті, які використовувались до цього і розробити технологію зміцнення робочих поверхонь скребків.

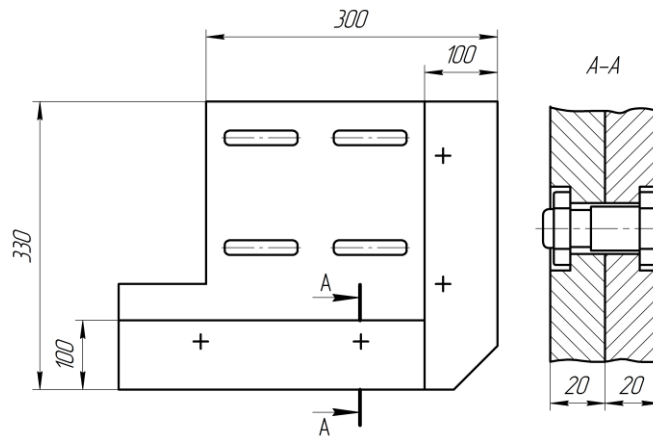


Рис. 3. Схема збірного скребка установки для змішування вогнетривких мас

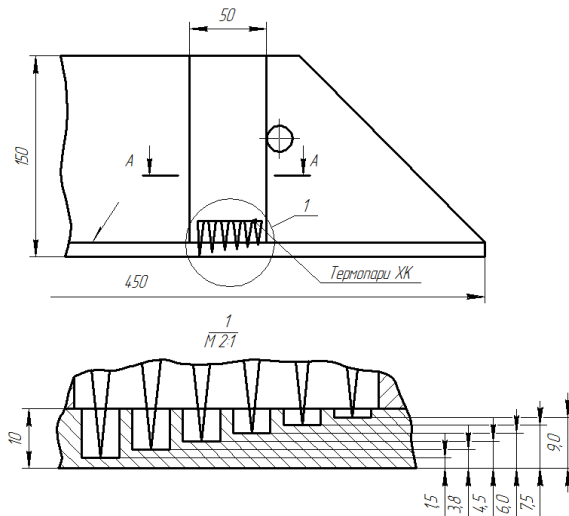


Рис. 4. Схема установки термопар в скребку для замірів температур в процесі зношування

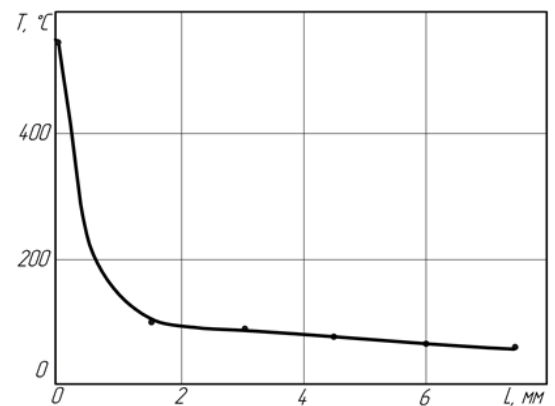


Рис. 5. Характер зміни температури на робочій кромці скребка по мірі віддалення від поверхні тертя

Для визначення температури поверхні штампів для пресування вогнетривких виробів розроблено нескладне пристосування, яке дозволяє за короткий час, практично не перериваючи роботи преса зробити виміри. Пристосування (рис. 6) включає хромель-копелеву термопару, розклепаний робочий спай, якої розміщений в поглиблення пластинки з поліуретану – матеріалу, що має достатню стійкість до нагрівання, пружність і низьку теплопровідність. При цьому, поглиблення в пластинці виконувалось такої глибини, щоб розклепаний спай надійно міг контактувати з поверхнею штампа. Пластинка з термопарою прикріплена до пружини стиснення, яка, в свою чергу, закріплена на сталевому диску. На цьому ж диску закріплено постійний магніт, таким чином, що спай термопару знаходиться на осі магніту. Загальний розмір незжатої пружини і товщина пластинки на 3 мм – 5 мм більше висоти магніту. Кінці термопару через отвори в пластинці виведені до приладу. Для виміру температури штампа пристосування встановлювалося на його поверхні. При цьому за рахунок дії магніту пружина стискалась, створюючи зусилля на поліуретанову пластинку, яка пружно деформується, обтискала спай термопару. Тим самим практично виключався тепловідвід від спаю термопару. Через 5 с – 10 с за показниками приладу визначалась температура поверхні штампа.



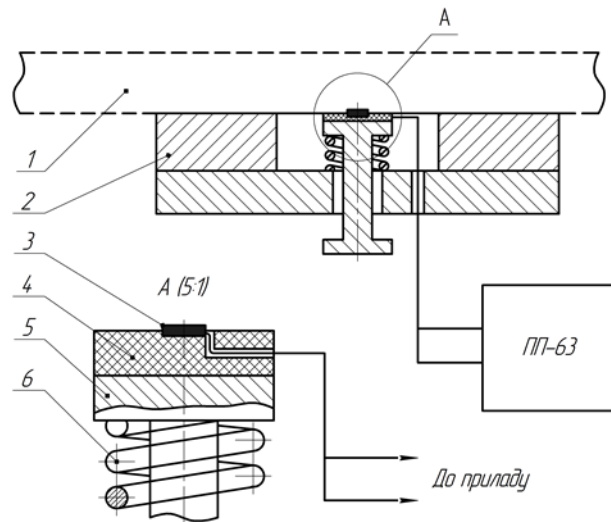


Рис. 6. Пристосування для виміру температури на поверхні штамп в процесі роботи  
1 – штамп; 2 – магніт; 3 – спай термопар; 4 – поліуретанова пластина; 5 – шток; 6 – пружина

Визначення температури поверхні тертя зразків при випробуваннях на зношування закріпленим абразивом на установці Х4-Б проводили з використанням зразка-датчика (рис. 7) [7]. Матеріалом зразка 1 служить хромель, до якого приварюється тонкий копелевий дріт 2. Таким чином, виходить гарячий спай хромель-копелевої термопар (холодний спай 6 знаходиться у водно-льодовій суміші), який при зношуванні зразка поступово виходить на поверхню тертя. ТЕРС ланцюга термопар реєструється вимірювачем 4 і автоматично записується. В деякий момент гарячий спай зношується настільки, що настає його руйнування. За значенням ТЕРС, виміряної в момент, який передуює розриву гарячого спаю, визначається температура поверхні тертя датчика. Передбачається, що при випробуваннях зразків, теплопровідність яких близька до теплопровідності хромелю (залізовуглецеві сплави), температура їх поверхні тертя буде приблизно дорівнювати температурі поверхні тертя датчика в тих же умовах випробувань.

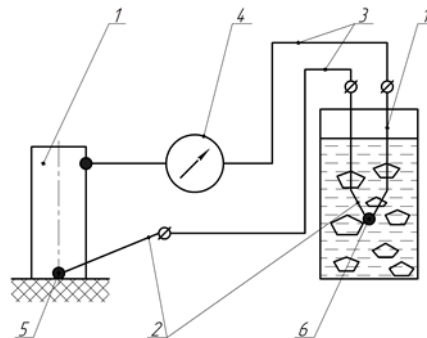


Рис. 7. Схема вимірювання температури поверхні тертя зразка із хромелю при абразивному зношуванні  
1 – зразок із хромелю; 2 – копелевий дріт; 3 – компенсаційні дроти; 4 – вимірювач ТЕРС;  
5 – гарячий спай; 6 – холодний спай

Зазначеним способом були проведені вимірювання температури поверхні тертя датчика при випробуваннях на абразивне зношування при різних швидкостях ковзання по абразиву. При мінімальній частоті обертання барабану  $12,5 \text{ хв}^{-1}$  швидкість ковзання становить  $70 \text{ мм/с}$ . Максимальна частота обертання, при якій були проведені випробування, становила  $630 \text{ хв}^{-1}$ , що відповідає швидкості ковзання  $3533 \text{ мм/с}$ . Після обробки записів результатів вимірювань ТЕРС для кожної швидкості ковзання по абразиву отримані залежності виду «швидкість ковзання – температура» (рис. 8) [7]. Останні значення температури перед руйнуванням спаїв термопар для кожної з швидкостей ковзання відповідають дійсній температурі поверхні тертя. Всі

випробування з визначення температури поверхні тертя датчика проводили на абразивній шкірці при одноразовому проходженні зразка по одній і тій же поверхні абразиву.

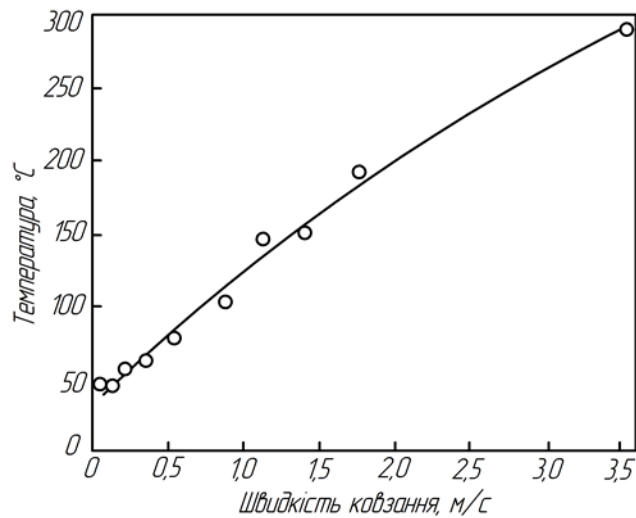


Рис. 8. Температура поверхні тертя зразків при різній швидкості ковзання по абразиву

Як і слід було очікувати, залежність має лінійний характер. Лише при температурі  $290^{\circ}\text{C}$  С спостерігається невелике відхилення від прямої в бік меншої температури. Ймовірно, в цих умовах вже починає проявлятися вплив тепловідведення з поверхні тертя вглиб зразка.

Необхідно відзначити, що навіть при мінімальній швидкості ковзання зразка по абразиву (70 мм/с), фіксується деякий фрикційний нагрів поверхні тертя. Це ще раз вказує на те, що в реальних умовах роботи деталей машин навряд чи зустрічається абразивне зношування абсолютно безфрикційного нагрівання.

Крім дослідження абразивного зношування вчені, часто вимірювали температуру і при інших видах поверхневого руйнування. Зокрема, в збірнику наукових праць [8] представлена схема вимірювання температури при сухому ковзанні метал по металу (рис. 9). В даному випадку, по полірованому сталевому кільцю ковзає константановий дріт. Ці метали утворюють термопару і в процесі ковзання ТЕРС фіксується осцилографом. При зрізанні «містків зчеплення», які виникають при терті, розвиваються температури близько  $1000^{\circ}\text{C}$ , які тривають менше  $10^{-4}$  с. Навіть при наявності мастильних плівок також можуть бути отримані високі поверхневі температури [8]. Вже при досить малих нормальних зусиллях і швидкостях ковзання температури можуть складати сотні градусів. Інформація про їх рівень може мати велике значення для теорії та практики граничного тертя, а також для вибору і розробки мастильних матеріалів.

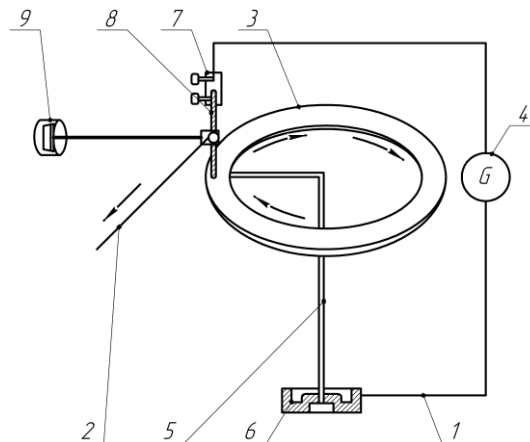


Рис. 9. Спрощена схема пристосування для вимірювання ТЕРС, яка виникає між поверхнями зразка і сталюого кільця при ковзанні

1 – мідний дріт; 2 – натяжний дріт для вимірювання сили тертя; 3 – стальне поліроване кільце; 4 – вимірювальний прилад; 5 – стойка; 6 – основа; 7 – державка; 8 – зразок; 9 – рухомий вантаж

Характерною особливістю абразивного зношування металевих матеріалів є дуже мала площа реального контакту абразивних зерен із зношеною поверхнею, в порівнянні із загальною площею поверхні тертя. Тому, навіть при невеликому загальному навантаженні, напруження в місцях контакту досягають значень, достатніх для пластичної деформації металу, який зношується і локального підвищення температури.

Існують три рівня підвищеної температури в зоні поверхні тертя металевих матеріалів при абразивному зношуванні:

1) температура спалаху в зоні одиничного контакту абразивного зерна з поверхнею тертя. Вона є максимальною контактною температурою і може досягати значень декількох сотен градусів Цельсія на ділянках, розміром від частки мікрона до декількох мікрон в перетині. Загальна тривалість спалаху складає від декількох наносекунд до декількох мікросекунд [9];

2) середня температура поверхні тертя, що виникає в результаті сумарної дії температурних спалахів в контактах. Вона приблизно вдвічі нижча за температуру спалаху [9, 10];

3) температура в обсязі тіла, яка інтенсивно знижується зі збільшенням відстані від поверхні (див. рис. 5).

Вимірювання об'ємної температури металевих деталей і зразків при абразивному зношуванні не дозволяє судити про її рівень на поверхні тертя через великий градієнт перпендикулярний до поверхні, яка зношується. Результати вимірювання середньої температури поверхні тертя дозволяли б опосередковано визначати температуру на кожному з трьох рівнів фрикційної взаємодії абразиву і матеріалу.

Розглянуті раніше методи дозволяють реєструвати деяку усереднену величину поверхневої температури при терті абразивних частинок. У той же час процеси зношування відбуваються при впровадженні та відносному переміщенні окремих зерен, тому представляє інтерес визначити температуру в одиничному контакті.

В ЗНТУ Пугачовим Г. О. [11] розроблено прилад для вимірювання температури в одиничному контакті (рис. 10).

Виміряти температуру в одиничному контакті дає можливість застосування методу природної термопари [12], яка є практично безінерційною, так як роль робочого спаю в даному випадку виконує сам контакт елементів, що ковзають один відносно одного. Розроблене пристосування на базі приладу ПМТ-3 дозволяє визначити контактні температури при терті в залежності від навантаження і швидкості ковзання.

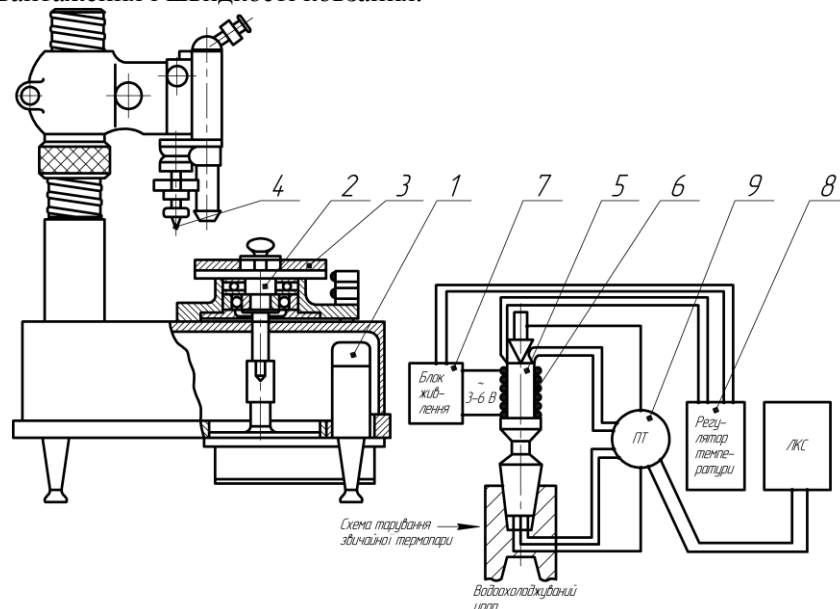


Рис. 10. Схема пристосування для визначення контактної температури при терті

На корпусі мікротвердоміра розташований вузол приводу зразка, що складається з мотор-редуктора 1 і планшайби 2, яка обертається. Зразок 3 діаметром 110 мм і товщиною 10 мм з полірованою робочою поверхнею закріплюється на планшайбі. Як матеріал зразка була

прийнята сталь 140X12Ф1. Індентор 4, виконаний з твердого сплаву ВК-15, у вигляді чотиригранної піраміди з кутом при вершині  $130^\circ$  встановлюється замість алмазного. Електрична схема живлення електродвигуна дозволяє автоматично відключати його після кожного обороту планшайби. Практично миттєва зупинка зразка забезпечується електрогальмами на двигуні. Час одного обороту визначається електричним секундоміром.

Навантаження індентора до 200 г здійснювалось за допомогою вантажів приладу ПМТ-3. Більш високі навантаження створювалися спеціальною приставкою. ТЕРС, яка виникає в контакті зразок – індентор при ковзанні, реєструвалась на стрічці самописця ЛКС.

Тарування природних термопар проводилось за спеціально розробленою методикою. Тарувальний пристрій (див. рис. 10) складається зі зразка 5, нагрівача 6, блоку живлення 7 з контрольно-регулюючим пристроєм 8, які працюють в комплекті зі штучною хромель-копелевою термопарою (ХК), двох контрольних ХК термопар, з яких одна розташована у водоохолоджуваного кінця зразка 5, а інша – в зоні контакту індентора і перемикача 9. ТЕРС всіх чотирьох термопар по черзі записувалась на стрічці самописця. Знаючи температуру на торці зразка 5 за контрольною термопарою і ТЕРС природної термопари, проводиться її тарування.

В результаті досліджень на цьому приладі сталі 140X12Ф1 були визначені закономірності зміни температури в залежності від навантаження і швидкості ковзання (рис. 11). Встановлено, що при малих швидкостях ковзання (5 мм/с) температури в контакті сталь 140X12Ф1 – твердий сплав ВК-15 знаходяться на рівні кімнатних та практично не змінюються з ростом навантаження від 2 Н до 298 Н. У той же час збільшення швидкості ковзання до 700 мм/с в тому ж діапазоні навантажень призводить до зростання контактних температур до  $550^\circ\text{C}$ . Отримана інформація про температуру в одиничному контакті дозволила обґрунтовано обирати режими випробувань зразків на лабораторних стендах, а також пояснювати отримані при цьому результати. Крім того, ці данні дозволяють орієнтовно прогнозувати усереднену температуру поверхні тертя деталей виробничого обладнання (бандажі прес-вальців, ножі сит для протирання абразивних мас та ін.), виходячи з умов їх роботи.

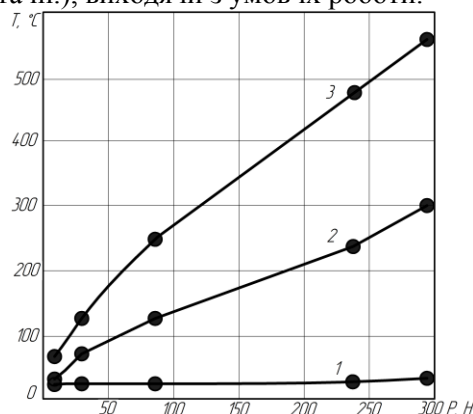


Рис. 11. Залежність температури поверхні при терті в одиничному контакті від навантаження та швидкості ковзання

1 –  $V=5$  мм/с; 2 –  $V=300$  мм/с; 3 –  $V=700$  мм/с

В деяких випадках через конструктивні особливості деталей або схеми їх роботи, використання термопар для оцінки температури поверхні тертя буває неможливим або значно ускладненим. В такому разі можна застосовувати безконтактні способи вимірювання температури при фрикційному нагріванні. Вони засновані на реєстрації інтенсивності теплового або іншого випромінювання від нагрітого об'єкту.

Для безконтактного вимірювання температури на поверхні зразка при великих швидкостях ковзання абразивної маси, був розроблений прилад [11], датчиком якого служить напівпровідниковий імерсійний болометр БП1-2 (рис. 12).

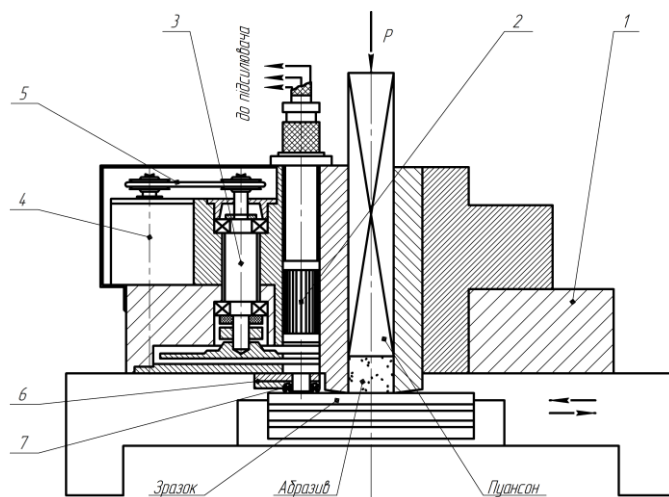


Рис. 12. Схема вузла модулятора для вимірювання температури зразка

У верхній плиті вузла тертя встановлений болометр 2, світловий потік, що падає на нього, перетинається модулятором 3. Під дією інфрачервоних променів опір болометра, розташованого в фокусі германієвої лінзи, змінюється пропорційно довжині хвилі. Германій пропускає довжину хвилі до 5-6 мкм, що відповідає максимальному випромінюванню при температурі до 600° С [11]. Привід модулятора складається з електродвигуна постійного струму 4 і ремінної передачі, частота модуляції регулюється числом обертів електродвигуна. Так як світловий потік залежить від температури і випромінювальної здатності тіла, то для очищення поверхні зразків, яка зношується, передбачено пристрій 6 з ущільнювальним гумовим кільцем 7 (див. рис. 12).

Таким чином, існує ряд способів, приладів, обладнання за допомогою яких можна визначати температуру поверхонь тертя та пришовної зони. Їх вибір залежить від конструкції та умов роботи деталей та зразків.

### Висновки

1. Одним із основних параметрів умов роботи деталей, який негативно впливає на зносостійкість та здатність до самозміцнення поверхні тертя в процесі зношування є температура.

2. Найбільш чутливими до підвищення температури поверхні тертя є матеріали з великою кількістю в структурі метастабільного залишкового аустеніту здатного до перетворення в процесі зношування в мартенсит деформації.

3. Частіш за все підвищення температури поверхні тертя може відбуватися або в результаті фрикційного нагрівання, або ж в наслідок переробки нагрітих матеріалів.

4. Для визначення температури робочих поверхонь деталей найкраще підходять: контактний спосіб, за допомогою термоелектричних термометрів (термопар); безконтактний, в якому датчиком служить напівпровідниковий іммерсійний болометр БП1-2, що працює в інфрачервоній частині спектру.

5. Використання термоелектричних термометрів (термопар) за запропонованими схемами і пристосуваннями дозволив встановити, що температура робочих поверхонь скребків змішувачів може підвищуватись до 500° С. А температура поверхонь штампів для пресування вогнетривів, в результаті примусового нагрівання може сягати 200° С.

6. При випробуваннях на установці Х4-Б при збільшенні швидкості ковзання від 0,1 м/с до 3,5 м/с температура поверхні тертя збільшується від 40° С до 290° С.

### Інформаційні джерела

1. Коваль А. Д. Абразивное изнашивание железоуглеродистых сплавов при фрикционном нагреве / А. Д. Коваль, М. Н. Брыков // Трение и износ. – 2010. – №3. С.305-311.

2. Осипов М.Ю., Холод А.В., Андрущенко М.И. Изменение интенсивности фазовых превращений в процессе изнашивания и износостойкости в зависимости от температуры испытаний / Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та

довговічності виробів". – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 129-130.

3. Теплотехнические измерения и приборы. Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». / Преображенский В. П. – 3-е изд., перераб. – М.: «Энергия», 1978. – 704 с.

4. Крамарухин Ю. Е. Приборы для измерения температуры. — М.: Машиностроение, 1990. 208 с.

5. Никонов Н.В. Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство. М.: ООО «МТК «Метотехника», 2015. – 62 с.

6. Схемы включения и компенсации термопар [Электронный ресурс] / Школа для электриків. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/izmeren/1936-skhemu-vkljucheniya-i-kompensacii.html> – 05.06.2019 р. – Загол. з екрану.

7. Брыков М. Н. Определение температуры металлических материалов при испытаниях на абразивное изнашивание / М. Н. Брыков // Вісник технологічного університету Поділля. – 2004. - № 1, Ч. 1. - С. 38-41.

8. Испытания металлов. Сборник статей под. ред.. К. Нитцше М.: Металлургия, 1967. – 452 с.

9. Bhushan B. Introduction to Tribology. - New York: John Wiley, 2002. - 700p.

10. М.Н.Брыков. Определение допустимой скорости скольжения образцов по абразиву при стандартных испытаниях на изнашивание // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: Збірник наукових праць Запорізького держ. техн.ун-та. - 2000. - №1. - С.39-41.

11. Пугачов, Г.А. Исследование износостойкости сплавов при трении в абразивной массе и разработка наплавочных материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Г.А. Пугачов. – Запорожье, 1979. – 216 с.

12. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. – 231 с.

**Андрущенко М.И., к.т.н., Куликовский Р.А., к.т.н., Акрытова Т.А., асп., Капустян О.Е., к.т.н., Брыков М.Н., д.т.н., Осипов М.Ю., к.т.н.**  
Запорожский национальный технический университет (ЗНТУ)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ТЕРМОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗНАШИВАНИЯ**

*Показано, что одним из основных параметров, который негативно влияет на износостойкость и способность к самоупрочнению поверхности трения деталей в процессе изнашивания, является температура. Особенно это касается материалов с большим количеством в структуре метастабильного аустенита. В зависимости от химического состава метастабильного аустенита негативное влияние нагрева поверхности трения может сказываться уже при температурах около 100° С. Поэтому для обоснованного выбора материалов для изготовления или восстановления деталей и их структуры нужна информация об уровне температуры, возникающей на поверхности трения в процессе изнашивания.*

*В работе рассмотрены два основных способа термометрии, которые лучше всего подходят для определения температуры рабочих поверхностей деталей. Это контактный, с помощью термоэлектрических термометров (термопар), и бесконтактный, в котором датчиком выступает полупроводниковый иммерсионный болометр БП1-2, работающий в инфракрасной части спектра.*

*Предложены способы, схемы и приспособления для определения температур рабочих поверхностей скребков смесителей огнеупорной массы и штампов для прессования огнеупоров в производственных условиях. А также поверхностей трения образцов при испытаниях на стандартной установке Х4-Б и на лабораторном стенде, разработанном в ЗНТУ.*

**Ключевые слова:** износ, температура, термометрия, термопара, лабораторные испытания, установка для испытаний, методика испытаний

**Andrushchenko M., Ph.D., Kulykovskiy R., Ph.D., Akrytova Taisiia**  
**Капустян О., Ph.D., Brykov M., Ph.D., Osipov M., Ph.D.**  
Zaporozhye National Technical University

**RESEARCH OF METHODS AND THERMOMETRY DEVICES FOR  
DETERMINING THE TEMPERATURE OF SURFACE FRICTION OF DETAILS IN THE  
PROCESS OF WEAR**

*It is shown that temperature is one of the main parameters, which negatively affects the wear resistance and the ability of self-strengthening of the friction surface of parts in the process of wear. This is especially true of materials with a large amount in the structure of the metastable austenite. Depending on the chemical composition of the metastable austenite, the negative effect of friction surface heating can already affect at temperatures of about 100° C. Therefore, an informed choice of materials and their structure for manufacturing or restoring parts requires information on the temperature level that occurs on the friction surface during wear. Equally important is the temperature value in the heat-affected zone during welding or welding.*

*The paper discusses two basic methods of thermometry, which are best suited for determining the temperature of working surfaces of parts. Contact method using thermoelectric thermometers (thermocouples) and non-contact, in which the sensor is a semiconductor immersion bolometer BP1-2, operating in the infrared part of the spectrum.*

*Methods, schemes and devices for determining the temperatures of the working surfaces of the scrapers of the refractory mass mixers and dies for pressing refractories under production conditions are proposed. As well as friction surfaces of samples when tested on a standard installation X4-B and on a laboratory bench, developed in ZNTU.*

**Keywords:** *wear, temperature, thermometry, thermocouple, laboratory tests, test setup, test method*

УДК 621.787.4

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-3>

Бадір К.К.

Національний авіаційний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МАГНІТО-ТУРБУЛЕНТНОГО ОЧИЩЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Ресурс і експлуатаційні характеристики трибосистем кочення та, нормальна працездатність машин і механізмів в цілому суттєво залежать від чистоти їх робочих поверхонь. У результаті підвищення ефективності очищення трибовузлів машин і змащувальних робочих рідин ресурс механізмів цих машин може бути збільшено в 2-3, а у випадках з прецизійними вузлами – до 10 разів. Таким чином, забезпечення і контроль чистоти трибосистем кочення, дозволить покращити їх експлуатаційні характеристики та збільшити ресурс, що на сьогодні є актуальним науково-технічним завданням. Одним із способів підвищення ресурсу та покращення експлуатаційних характеристик підшипників кочення є ефективне видалення забруднень з робочих поверхонь, що має особливе значення для спеціальних та прецизійних підшипників, які широко використовуються в різних галузях промисловості, та дає змогу запобігти передчасному їх зношуванню і скоротити витрати на обслуговування й ремонт. Літературний аналіз та результати досліджень показали, що віброакустичні параметри (віброшвидкість та віброприскорення), як основні параметри стану якості трибосистем кочення, безпосередньо залежать окрім точності виготовлення і складання, також від чистоти робочих поверхонь та відсутності різного роду забруднень, зокрема металічних.

**Ключові слова:** моделювання, очищення, підшипник, забруднення, магнітне поле

Для вивчення процесів, що мають місце під час видалення механічних забруднень з поверхонь підшипників кочення, з метою розробки ефективних методів і засобів очищення була побудована фізико-математична модель. В якій розглянуто вплив складових сил, що здійснюють вплив під час видалення забруднень з трибосистем кочення змінним імпульсним магнітно-турбулентним методом.

При взаємодії електромагнітних полів з поверхнями деталей підшипника кочення відбувається взаємне переміщення рухомих елементів його конструкції, що перебуває в стадії очищення та формування гідравлічних потоків миючого середовища [1-4, 7].

Математична модель процесу видалення забруднень та залишків змащувальних матеріалів з поверхонь деталей підшипників кочення побудована з використанням наступних припущень:

1. Частинка забруднення має сферичну форму.
2. Розглядається зовнішнє кільце підшипника, поверхня якого є ідеальним циліндром.
3. Сила зчеплення частинки забруднення з поверхнею підшипника не залежить від напрямку зміщення забруднення і спрямована протилежно до зміщення.
4. Взаємодія частинки забруднення з підшипником та рідиною з достатньою точністю описується законами класичної механіки та гідравліки.

Розглянемо сили, що діють на забруднення сферичної форми, яке міститься на поверхні кільця підшипника (рис. 1 а, б). Кільце підшипника обертається в миючій рідині.

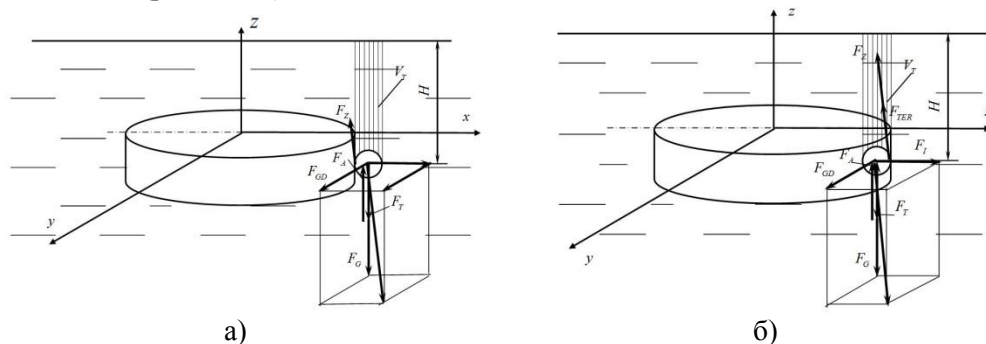


Рис. 1. Сили, що діють на забруднення сферичної форми: а – на зовнішній поверхні кільця підшипника; б – на внутрішній поверхні кільця підшипника



До них належать:

1. Сила тяжіння

$$F_T = mg, \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки забруднення, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

2. Сила зчеплення частинки забруднення з матеріалом кільця підшипника  $F_Z$ . Враховуючи, що матеріал забруднення варіюється, сила зчеплення також може мати різну природу, що ускладнює її теоретичне визначення і переводить цю задачу в область експериментальних досліджень.

3. Сила Архімеда, що прагне виштовхнути частинку забруднення з середовища, в якому вона знаходиться (очишувальної рідини):

$$F_A = \rho g V, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питома маса (густина) рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – об'єм частинки забруднення,  $\text{м}^3$ .

$$\text{Згідно прийнятого нами припущення, що частинка має сферичну форму: } V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (3)$$

$r$  – радіус частинки.

Тоді з врахуванням (3) вираз (2) для визначення сили Архімеда прийме вигляд:

$$F_A = \frac{4}{3} \rho g \pi r^3. \quad (4)$$

Слід зазначити, що сила Архімеда діє не лише на частинку рідини, але й на об'єм підшипника. Суттєвим вплив сили Архімеда є за умови, що питома маса матеріалу забруднення є менша за питому масу рідини або одного порядку з нею. Якщо  $\rho_z > \rho$  ( $\rho_z$  – питома маса забруднення  $\text{кг/м}^3$ ), то сила Архімеда не чинить суттєвого впливу на видалення забруднення і її можна не враховувати.

5. Вертикальна складова сили тиску, що сприяє осадженню забруднення:

$$F_G = \rho g V_T, \quad (5)$$

де  $V_T$  – об'єм тіла тиску, що обмежене вільною поверхнею рідини, поверхнею забруднення та вертикальною циліндричною поверхнею, що проходить по контуру поверхні забруднення.

З геометричних міркувань

$$V_T = \pi r^2 H - \frac{2}{3} r^3 = \pi r^2 \left( H - \frac{2}{3} r \right), \quad (6)$$

де  $H$  – глибина занурення центра мас частинки забруднення під вільну поверхню рідини, м.

Формула (5) з врахуванням (6) матиме вигляд:

$$F_G = \rho g \pi r^2 \left( H - \frac{2}{3} r \right), \quad (7)$$

Величина вертикальної складової сили тиску прямопропорційна глибині занурення центра мас частинки забруднення під вільну поверхню рідини. Горизонтальні складові сили тиску на частинку забруднення врівноважуються, тому їх не враховано. Видалення деяких забруднень відбувається ще до надання підшипнику певної частоти обертання, на етапі занурення його в рідину.

При цьому можливо два випадки:

а) частинка забруднення спливає на вільну поверхню рідини, якщо

$$F_A > F_T + F_G + F_Z. \quad (8)$$

Підставивши в формулу (8) вирази (1), (4), (7) отримаємо умову спливання забруднення на поверхню рідини за умови відсутності обертання підшипника:

$$F_Z < \rho g \pi r^2 (2r - H) - mg, \quad (9)$$

що можливе при умові  $m < \rho g \pi r^2 (2r - H)$ .

б) частинка забруднення опускається на дно миючої камери з рідиною

$$F_A + F_Z < F_T + F_G. \quad (10)$$

Підставивши в формулу (10) вирази (1), (4), (7) отримано умову опускання забруднення на дно миючої камери з рідиною, за умови відсутності обертання підшипника:

$$F_Z < \rho g \pi r^2 (2r - H) + mg, \quad (11)$$

Формула (11) є умовою гідростатичного осадження забруднення, аналіз якої свідчить, що можна підібрати таку глибину занурення  $H$ , за якої ця умова буде виконуватись, а отже

забруднення будуть видалятися. Проте, через великі сили зчеплення реалізація цієї умови може вимагати занурення підшипника на більшу глибину.

2. Відцентрова сила інерції

$$F_I = m\omega^2 R, \quad (12)$$

де  $\omega = \pi n/30$  – кутова швидкість обертання кільця підшипника, рад/с;  $n$  – частота обертання кільця підшипника, об/хв.,  $R$  – відстань від центру обертання до центра мас частинки забруднення.

Слід зазначити, що для забруднення, що знаходиться на зовнішній поверхні кільця підшипника, відцентрова сила сприяє видаленню забруднення, а для частинки, що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника (рис. 1 б), навпаки, ускладнює видалення забруднення, створюючи додаткову силу тертя між частинкою забруднення та кільцем підшипника:

$$F_{TER} = k_0 F_I, \quad (13)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт тертя спокою, що залежить від матеріалу забруднення та матеріалу кільця підшипника.

Тоді формула (13) з врахуванням (12) матиме вигляд:

$$F_{TER} = \frac{k_0 \pi^2 m n^2 R}{900}, \quad (14)$$

Тому з підвищенням частоти обертання підшипника видалення забруднень з внутрішніх поверхонь кільця підшипника ускладнюється, що обмежує частоту обертання підшипника.

6. Сила опору руху частинки забруднення рідини, яка залежить від швидкості руху рідини і визначається:

– для ламінарного режиму за формулою Стокса:

$$F_{GD} = 6\pi\mu r\nu, \quad (15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини Па·с;  $\nu$  – середня швидкість рідини. Для ламінарного режиму

$$\nu = u_{\max} / 2, \quad (16)$$

де  $u_{\max}$  – максимальна швидкість.

Внаслідок наявності в'язкості рідини її шари, що контактують з поверхнею кільця підшипника мають швидкість відносно рухомої поверхні близьку до нуля і рухаються з такою ж швидкістю (рис. 2 а, б) [5, 6]. Тому максимальна швидкість визначається як:

$$u_{\max} = \omega R_1 = \frac{\pi n R_1}{30}. \quad (17)$$

де  $R_1$  – відстань від центру обертання до точки контакту поверхні підшипника з забрудненням.

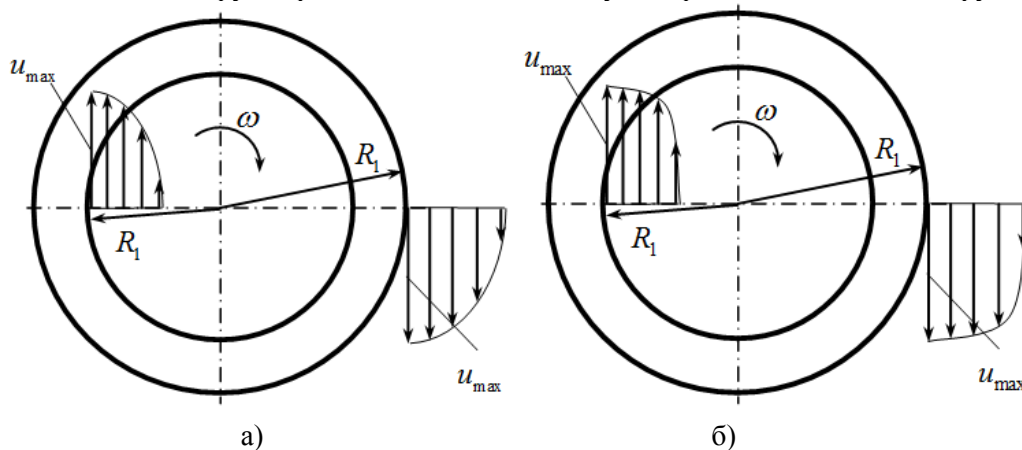


Рис. 2. Розподіл швидкостей в контактному шарі з поверхнею кільця підшипника: а – ламінарний рух; б – турбулентний рух

З урахуванням (16) та (17) формула Стокса (15) матиме вигляд:

$$F_{GD} = \frac{\pi^2 \mu r n R_1}{10}. \quad (18)$$

– для турбулентного режиму руху за законом Ньютона:

$$F_{GD} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (19)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору, що характеризує форму тіла;  $v$  – середня швидкість рідини.

Для турбулентного режиму  $v = \frac{u_{\max}}{1,15 \dots 1,3}$ . Тому приймемо, що:

$$v = \frac{u_{\max}}{1,2}, \quad (20)$$

$S$  – площа проекції тіла на площину, що перпендикулярна до напрямку руху.

Для сферичної частинки забруднення:

$$S = \pi r^2 / 4, \quad (21)$$

З врахуванням (17), (20), (21) формула (19) набуде вигляду:

$$F_{GD} = C_x \frac{\pi^2 \rho n^2 R_1^2 r^2}{10368}. \quad (22)$$

Таким чином, для видалення забруднення під час обертання підшипника необхідно щоб виконувались наступні гідродинамічні умови:

А) для частинки, що міститься на зовнішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^2 + (F_T + F_G - F_A)^2} + F_I^2 > F_Z. \quad (23)$$

Б) для частинки, що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^2 + (F_T + F_G - F_A)^2} + F_I^2 - F_{TER} > F_Z. \quad (24)$$

Характер переміщення електромагнітного поля забезпечують періодичне розмагнічування матеріалу підшипника, коли сумарний вектор протікання струмів в матеріалі дорівнює нулю і сили магнітної взаємодії забруднення з деталями підшипника зникають. При цьому під дією інших складових сил взаємодії частки забруднення переходять у миючий розчин при виконанні гідродинамічних умов (23), (24). Далі, коли з'являється зовнішнє магнітне поле (МП) на забруднення буде діяти сила взаємодії магнітних зарядів, а так як напруженість зовнішнього МП більша за напруженість поля на поверхні деталей підшипників, це буде сприяти видаленню забруднення в потік в напрямку додаткового зовнішнього імпульсного магнітного поля (ДЗІМП).

Для визначення параметрів біжучого магнітного поля проведено ряд експериментів. Це пов'язано з урахуванням великої кількості факторів через особливості різних конструкцій підшипників кочення і матеріалів, з яких вони виготовлені, а також складу та стану забруднень, що призводить до слабкої кореляції математичних розрахунків.

На основі отриманих результатів експериментальних даних, індукція МП на поверхні герметичної камери складає 140 мТл, зовнішнє кільце підшипника має залишкову намагніченість близько 10 мТл, внутрішнє кільце – 9 мТл, індукція МП підшипника на відстані 15 мм від дна камери – 100 мТл.

Параметри МП, необхідні для ефективного видалення з робочих поверхонь трибосистем кочення мікро- та субмікрочасток забруднень це:

- амплітуда МП – для забезпечення ефективного видалення забруднень, повинна бути не меншою за половину висоти обойми (для середньої серії підшипників становить 13...15 мм);

- номінальна частота зміни полюсів імпульсного МП;

- ефективний час очищення в межах визначених оптимальних амплітуди магнітної індукції і частоти змінного імпульсного МП.

В якості миючої рідини використовувалось авіаційне паливо (РТ, ТС-1).

Магнітне поле ДЗІМП складається з двохполюсних елементів, що виконані з магнітотвердих матеріалів, і які розташовані по чергово -S-N-S-...S-N- на диску виконаному з заліза Армко або сталі 10 і служить магнітопроводом. Максимальна відстань дії ДЗІМП на підшипникову сталь ШХ15 виникає при повному її приляганні до джерела МП. Магнітна індукція одиничного джерела постійного магнітного поля (ДПМП) складає 450 мТл. Зі

збільшенням відстані до 50 мм ця величина зменшувалась до нуля. Після витримування зразка зі сталі ШХ15 на поверхні постійного магніту протягом 20 хв. ступінь намагніченості оцінювався тесламетром ЕМ 4305/1 і досягав 20 мТл. При очищенні трибосистеми кочення її поверхні знаходяться на відстані, яка складається з: відстані від поверхні джерела МП до дна камери; товщини матеріалу камери; відстані від нижньої поверхні підшипника до дна камери. Індуктивність МП в цьому випадку за рахунок екранування композиційним матеріалом камери зменшувалась до 140 мТл, а враховуючи відстані від підшипника до дна камери – 100 мТл. Це можливо досягти (враховуючи екранування елементами конструкції миючої ванни) використанням в якості ДПМП елементів, що виконані з магнітотвердих матеріалів дисперсійного твердіння системи неодим-залізо-бор, або самарій-кобальт, або застосуванням потужних електромагнітів.

При постійному МП намагніченість поверхонь підшипників мала пелюстковий характер (рис. 3., рис. 4). Найбільший рівень (рис. 3) намагніченості спостерігався на зовнішньому кільці підшипника і сягав 10 мТл. Внутрішнє кільце і тракт кочення намагнічуються до 9 мТл.

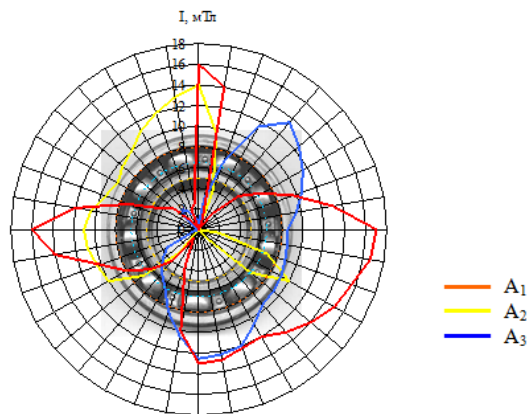


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції  $I$  поверхонь деталей підшипника відносно радіусів зовнішнього ( $A_1$ ) і внутрішнього кілець ( $A_2$ ), та сепаратора з тілами кочення ( $A_3$ ) після 10 хвилин намагнічування джерелом постійного МП

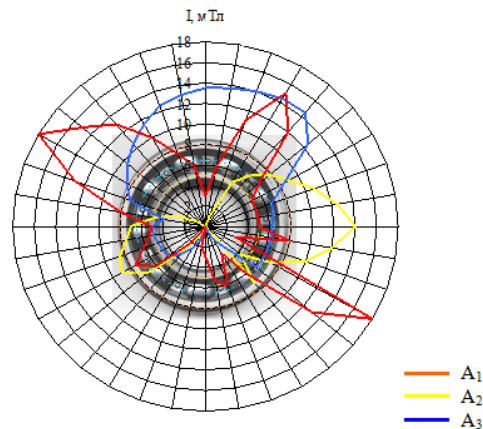


Рис. 4. Розподіл магнітної індукції  $I$  поверхонь деталей підшипника відносно радіусів зовнішнього ( $A_1$ ) і внутрішнього кілець ( $A_2$ ), та сепаратора з тілами кочення ( $A_3$ ) після 20 хвилин намагнічування джерелом постійного МП

Максимальна робоча частота змінного імпульсного МП повинна бути не менше 1000 Гц, оскільки експериментально встановлено, що на меншій частоті організація безконтактного обертання зовнішньої об'ємної об'єкта очищення ускладнена, а перевищення частоти в 5000 Гц викликає активний неконтрольований відтік миючої рідини від об'єкта очищення, що призводить до падіння ефективності видалення забруднень. Тому дослідження ступеня намагніченості проводились на цій та нижчих частотах. Згідно з результатами вимірювань (рис. 5) при взаємодії з полем визначеного значення протягом 5 хв. намагніченість деталей підшипників зменшувалась до 4...6 мТл.

Таким чином, згідно з результатами досліджень, при дії змінного імпульсного МП на об'єкт очищення, у випадку забезпечення оптимальних величини поля, частоти та часу

очищення ступінь намагніченості не перевищує 10% від максимальної амплітуди напруженості джерела МП в робочій зоні. Зменшення магнітної індукції джерела МП, діючого на підшипник кочення призводить до зменшення рівня намагніченості його деталей.

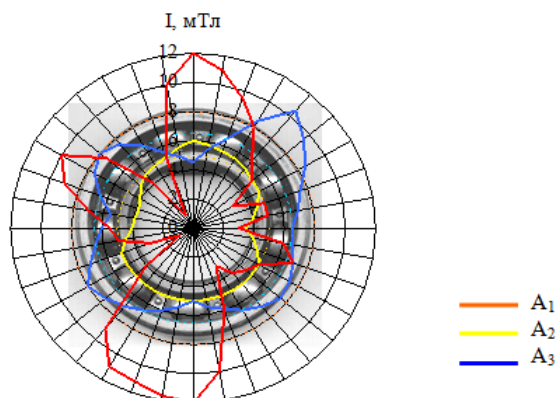


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції  $I$  поверхонь деталей підшипника відносно радіусів зовнішнього ( $A_1$ ) і внутрішнього кілець ( $A_2$ ), і сепаратора з тілами кочення ( $A_3$ ) після очищення протягом 3 хвилин при частоті імпульсного МП 4800 Гц

Таким чином, при односторонньому позиціонуванні для МП з зоною дії поля в 20 мм очищення буде ефективним для підшипників з висотою кілець до 15 мм. При двосторонньому позиціонуванні (при перестановці підшипника в змінному імпульсному МП з однієї сторони на іншу), очищення буде ефективним для підшипників з висотою кілець до 40 мм. Збільшення висоти кілець потребує створення ДМП з більшою індукцією та зоною дії поля і більшою напруженістю, або з більш складною конструкцією магнітопроводу.

#### Інформаційні джерела

1. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с. Коваленко В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. М.: Химия, 1978. 302 с.
2. Глезер А. М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходства, взаимные переходы. / А. М. Глазер // Рос. Хим. Ж., 2002. – Т.-№5.-С. 57-63.
3. Захаров В.А., Боровкова М.А., Комаров В.А., Мужичкий В.Ф. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. – Дефектоскопия, 1992, № 1, с. 41-46.
4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977г. – 526 с.
5. Расчет ресурса подшипников качения при переменных режимах нагружения / О.Леликов. – М.: Машиностроение, 2008. – 211 с. Справочник. Инженерный журнал: приложение к журналу.
6. Явленский А. К. Влияние макрогеометрии беговых дорожек колец подшипников на характер контактирования шариков с кольцами. – Труды ЛИАП, 1971, вып.. 73, С. 138–145.
7. Ткачук А.А. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування / А.А. Ткачук, В.Ю. Заблоцький, В.О. Дзюра // Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – №5 (2). - С. 158-163.

**Бадір К.К.**

Национальный авиационный университет

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

*Ресурс и эксплуатационные характеристики трибосистем качения и, нормальная работоспособность машин и механизмов в целом существенно зависят от чистоты их рабочих поверхностей. В результате повышения эффективности очистки узлов машин и смазочных рабочих жидкостей ресурс механизмов этих машин может быть увеличено в 2-3, а в случаях с прецизионными узлами - до 10 раз. Таким образом, обеспечение и контроль чистоты трибосистем качения, позволит улучшить их эксплуатационные характеристики и увеличить ресурс на сегодня является актуальным научно-техническим заданием. Одним из*

© Бадір К.К.

*способов повышения ресурса и улучшения эксплуатационных характеристик подшипников качения является эффективное удаление загрязнений с рабочих поверхностей, имеет особое значение для специальных и прецизионных подшипников, которые широко используются в различных отраслях промышленности, и позволяет предотвратить преждевременное их износ и затраты на обслуживание и ремонт. Литературный анализ и результаты исследований показали, что виброакустические параметры (виброскорость и виброускорения), как основные параметры состояния качества трибосистем качения, напрямую зависят кроме точности изготовления и сборки, а также от чистоты рабочих поверхностей и отсутствия различного рода загрязнений, в том числе металлических.*

**Ключевые слова:** моделирование, очистка, подшипник, загрязнения, магнитное поле

**K. Badir**

National Aviation University

### **MODELING THE PROCESS OF MAGNETIC-TURBULENT CLEANING OF ROLLING BEARINGS**

*The resource and operational characteristics of the rolling tribosystems and the normal operation of machines and mechanisms as a whole substantially depend on the cleanliness of their working surfaces. As a result of increasing the cleaning efficiency by tribo-tilting machines and lubricating fluids, the life of the mechanisms of these machines can be increased by 2-3, and in cases with precision assemblies - up to 10 times. Thus, the provision and control of the purity of the rolling tribosystems will allow to improve their performance and increase the resource today is a relevant scientific and technical task. One of the ways to increase the service life and improve the performance of rolling bearings is the effective removal of contamination from working surfaces, is of particular importance for special and precision bearings, which are widely used in various industries, and helps prevent their premature wear and maintenance and repair costs. Literary analysis and research results showed that vibroacoustic parameters (vibration velocity and vibration accelerations), as the main parameters of the quality of the tribosystem rolling, directly depend on the accuracy of manufacturing and assembly, as well as on the cleanliness of working surfaces and the absence of various kinds of pollution, including metallic ones.*

**Keywords:** modeling, cleaning, bearing, pollution, magnetic field

УДК 631.22.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-4>

Банга В.І., к.т.н., Крупич О.М., к.т.н.

Львівський національний аграрний університет

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИМІРЮВАЧА МАСИ КОМБІКОРМУ В БУНКЕРІ ДОЗАТОРА

*У статті наведено огляд і аналіз вимірювачів мас кормів, схему системи вимірювання та загальний вигляд вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора, передбачено наявність засобів для вимірювання, реєстрації та передачі інформації електричними сигналами біжучих значень маси комбікорму в бункері дозатора в динамічному режимі, відображення і зберігання інформації та контрольно-вимірювальні прилади.*

*Подано експериментальну установку та методику експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму з використанням теорії багатофакторного планованого експерименту, наведено рівні варіювання факторів, матрицю плану експерименту, рівняння регресії для визначення вихідної напруги вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора від зміни зусилля згинального моменту тензовимірювальної площини.*

*Запропонована методика експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора з використанням теорії планованого експерименту дає змогу встановити оптимальні значення досліджуваних факторів (площу поперечного перерізу і довжину тензовимірювальної площини та величину згинального моменту тензовимірювальної площини), підвищити достовірність результатів експерименту.*

**Ключові слова:** вимірювач маси, дозатор, комбікорм, експериментальна установка, планований експеримент, вихідна напруга, тензодатчик

**Постановка проблеми.** У технологічному процесі дозування комбікормів виникає потреба у вимірюванні рівня висоти сипких кормів а також сигналізації мінімально чи максимально допустимих рівнів у бункерах.

Вимірювання маси комбікорму в бункері дозатора є одним із важливих його показників які можуть мати вплив на продуктивність, рівномірність і точність дозування. У технологічному обладнанні, яке використовується для дозування сипких кормів, використовуються вимірювачі рівня в яких відхилення похибки вимірювання перевищує встановлені зоотехнічні вимоги на технологічний процес. Тому розробка методики вимірювання маси комбікормів в бункері дозатора є актуальним і перспективним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вимірювання рівня сипких мас має свої особливості. Характерною відмінністю сипких мас від рідких є непропорціональність передачі тиску на дно і стінки бункера в залежності від рівня висоти. Властивість сипких кормів утворювати при насипанні кут природного укусу дозволило створити серію маятникових вимірювачів, які працюють за принципом відхилення матеріалом чутливого елемента з жорсткою або гнучкою підвіскою. Огляд і аналіз існуючих конструкцій вимірювачів сипких кормів [1-3] показав, що існуючі вимірювачі рівня маятникового, вагового типу та мембранний датчик типу МДУ-3М не забезпечують відповідної похибки вимірювань, мають значну металоемність та вартість, складні за конструкцією. Відсутня методика експериментальних досліджень.

**Постановка завдання.** Наше завдання – підвищення точності вимірювання шляхом вдосконалення конструкції та визначення вихідної напруги вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора від зміни зусилля згинального моменту тензовимірювальної площини.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження впливу зміни маси комбікорму в бункері на продуктивність і рівномірність індивідуального дозатора у процесі досліджень був розроблений вимірювач маси комбікорму, схема системи вимірювання маси комбікорму та блок-схема і загальний вигляд вимірювача якого показані на рис. 1, 2, 3 [4].

В основу винаходу поставлена задача створення такого вимірювача маси комбікорму, в якому нове виконання вимірювального елемента дозволить спростити конструкцію вимірювача, зменшити металомісткість та підвищити точність вимірювання.

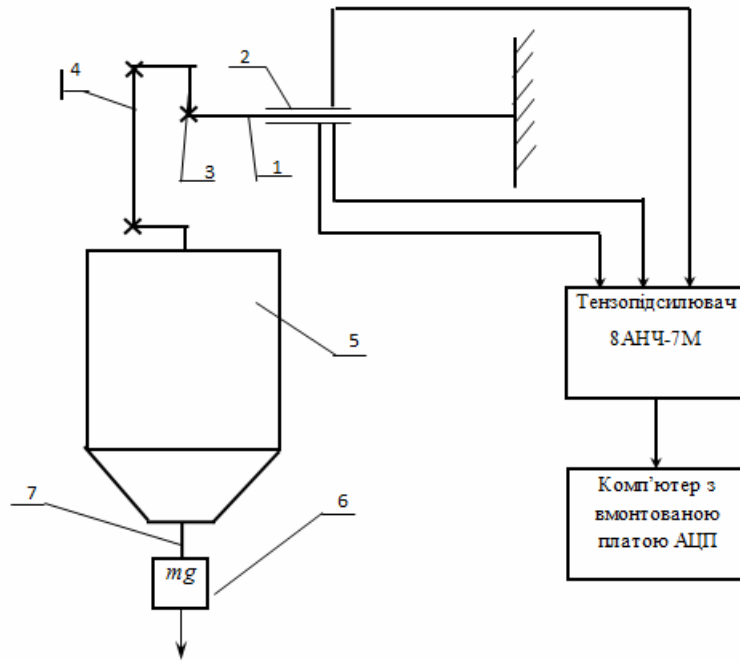


Рис. 1. Схема системи вимірювання маси комбікорму в бункері дозатора:  
 1 – пружна пластина; 2 – тензодатчі; 3 – призма; 4 – підвіска; 5 – бункер індивідуального дозатора; 6 – гиря; 7 – нитка підвісу гир.

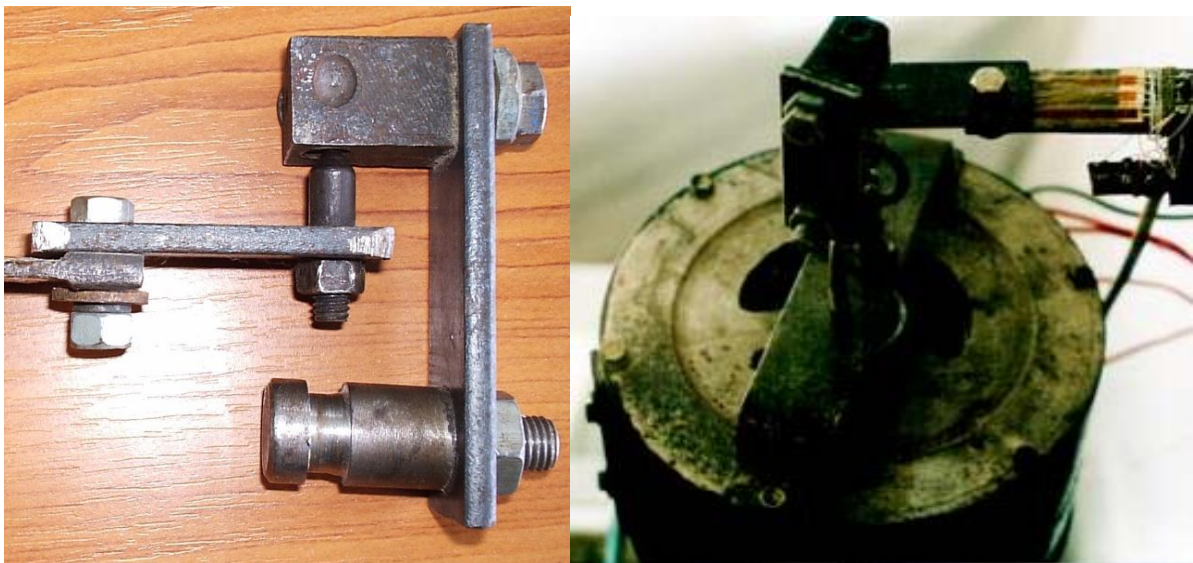


Рис. 2. Загальний вигляд вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора

Вимірювач маси комбікорму містить тензовимірювальну пружну пластину 1 яка закріплена жорстко на якій наклеєні тензодатчики 2 які з'єднані в мостову схему. До пружної пластини 1 закріплено призму 3, на до якої підвішена підвіска 4 з бункером дозатора комбікормів.

Дослідження проводили у такій послідовності. Сипкий матеріал завантажувався в приймальний бункер 5 дозатора. З бункера 5 комбікорм подавався на робочий орган дозатора. При зміні маси комбікорму в бункері тензовимірювальна пружна пластина 1 прогиналася. Прогин фіксувався тензодатчиками 2. Сигнал, який надходив від вимірювальної площини 1, як це показано на рис. 1, підсилювався тензопідсилювачем. Результуючі сигнали сприймав блок аналогово-цифрового перетворення L-154, який встановлений в комп'ютер. Запис реалізації випадкового процесу вимірювання маси комбікорму відображався на моніторі комп'ютера. Інформація в цифровому вигляді записувалася у файл досліджень, а за необхідності



виводилася на принтер.

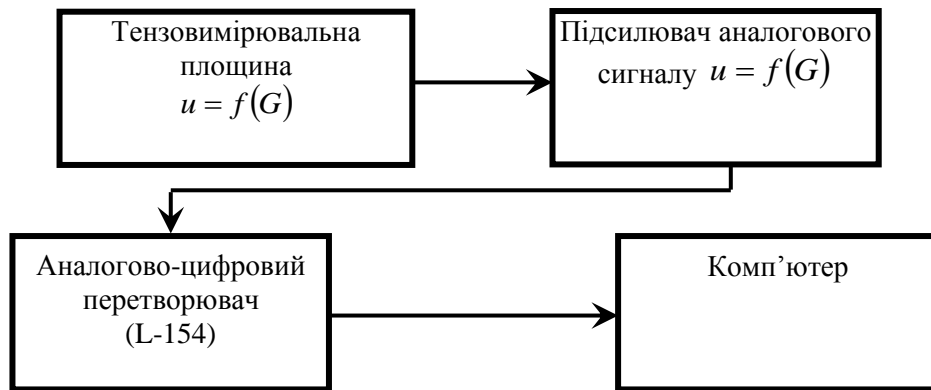


Рис. 3. Блок-схема вимірювання маси комбікорму в бункері дозатора

Загальний вигляд комп'ютера з вмонтованою платою АЦП L-154 наведено на рис. 4.

Аналогово-цифровий перетворювач L-154



Рис. 4. Загальний вигляд материнської плати комп'ютера з вмонтованою платою АЦП L-154

Основними перевагами запропонованої методики порівняно з існуючими є синхронна з роботою вимірювача маси комбікорму обробка результатів досліджень і відображення на моніторі комп'ютера або створення твердих копій процесу вимірювання у вольтах (В).

Для обґрунтування конструктивно-технологічних розмірів тензовимірювальної площини необхідно провести повний трифакторний планований експеримент на трьох рівнях типу  $3^k$ , ( $k$  – число факторів) плану другого порядку Бокса-Бенкіна за відомою методикою [5; 6]. Інтервали і рівні варіювання факторів наведені в табл. 1, а матриця плану у табл. 2.

Таблиця 1

Інтервали і рівні варіювання факторів

Рівень варіювання факторів	Кодовані значення	Площа поперечного перерізу $S$ , м <sup>2</sup>	Довжина тензовимірювальної площини $L$ , м	Згинальний момент тензовимірювальної площини $M$ , Н·м
Верхній	+	0,2	0,160	9,4
Основний	0	0,145	0,120	5,09
Нижній	-	0,09	0,080	0,78
Інтервал варіювання	$\varepsilon$	0,055	0,04	4,31

Таблиця 2

№ експерименту	Матриця плану експерименту Варіювання факторами			Критерій оптимізації $U, B$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	1	1	0	$y_1$
2	-1	-1	0	$y_2$
3	1	-1	0	$y_3$
4	-1	1	0	$y_4$
5	0	1	1	$y_5$
6	0	-1	-1	$y_6$
7	0	1	-1	$y_7$
8	0	-1	1	$y_8$
9	1	0	1	$y_9$
10	-1	0	-1	$y_{10}$
11	1	0	-1	$y_{11}$
12	-1	0	1	$y_{12}$
13	0	0	0	$y_{13}$
14	1	1	1	$y_{14}$
15	-1	-1	-1	$y_{15}$
16	-1	1	1	$y_{16}$
17	-1	-1	1	$y_{17}$
18	-1	1	-1	$y_{18}$
19	1	-1	-1	$y_{19}$
20	1	-1	1	$y_{20}$
21	1	1	-1	$y_{21}$
22	0	0	-1	$y_{22}$
23	0	0	1	$y_{23}$
24	0	1	0	$y_{24}$
25	0	-1	0	$y_{25}$
26	1	0	0	$y_{26}$
27	-1	0	0	$y_{27}$

За критерій оптимізації прийнято вихідну напругу тензодатчиків  $U$  вимірювача маси. Факторами, які впливають на вихідну напругу тензодатчиків  $U$ , були площа поперечного перерізу  $S$ , довжина тензовимірювальної площини  $L$ , згинальний момент тензовимірювальної площини  $M$ .

Перед початком експерименту вибирали межі зміни факторів та провели їх кодування.

Кодування факторів проводили за формулою [5; 6]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\varepsilon}, \quad (1)$$

де  $x_i$  – кодоване значення фактору (безрозмірна величина), верхній рівень позначається +1, нижній -1 (в центрі експерименту нульовий рівень);  $X_i$  – натуральне значення фактору;  $X_{i0}$  – натуральне значення фактору на нульовому рівні;  $\varepsilon$  – інтервал варіювання.

Інтервал варіювання визначали за формулою [5]:

$$\varepsilon = \frac{x^B - x^H}{2}, \quad (2)$$

де  $x^B, x^H$  – значення  $i$ -го фактору на верхньому і нижньому рівнях.

Рівняння регресії для трифакторної моделі доцільно шукати у наступній формі [12-14]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Для використання (3) в розрахунку проводили відповідні перетворення лінійних членів рівняння з кодованих значень в натуральні, які визначили за формулою [5]:

$$b_i x_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_i - \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_{0i}. \quad (4)$$

Перетворення лінійних членів рівняння, які взаємодіють, проводили за формулою [5]

$$b_{ij} x_i x_j = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \varepsilon_j} (X_i X_j - X_i X_{0j} - X_j X_{0i} + X_{0i} X_{0j}). \quad (5)$$

Для перетворення квадратних членів використовували формулу:

$$b_{ii} x_i x_i^2 = \frac{b_{ii}}{\varepsilon_i^2} (X_i^2 - 2X_i X_{0i} + X_{0i} X_{0i}^2). \quad (6)$$

Коефіцієнти регресії визначали з використанням ПЕОМ у редакторі Excel.

Перевіряли математичні моделі на однорідність дисперсій або на відтворення дослідів за виконання умови [ 5; 7]

$$G_{роз} \langle G_{таб}, \quad (7)$$

де  $G_{роз}, G_{таб}$  – розрахункове і табличне значення критерію Кохрена, яке вибирається з таблиці дод. 2 для рівня значущості 0,05 [5].

$G_{роз}$  – критерій Кохрена з числом степенів вільності для чисельника [5]:

$$f_u = c - 1, \quad \text{знаменника } f_z = N_p, \quad (8)$$

де  $C$  – число повторностей дослідів;

$N_p$  – число рядків плану.

Розрахункове значення критерію Кохрена  $G_{роз}$  визначаємо зі співвідношення [5; 7]:

$$G_{роз} = \frac{S_n^2 \max}{\sum_{n=1}^{N_p} S_n^2}, \quad (9)$$

де  $S_n^2 \max$  – максимальне значення рядкової дисперсії;

$\sum_{n=1}^{N_p} S_n^2$  – сумарне значення за рядковими дисперсіями.

Визначали дисперсію  $S_y^2$ , яка характеризує похибки дослідів у матриці плану за формулою [7]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_p} \sum_{i=1}^m (y_{iu} - \bar{y})^2}{N_p \cdot (m-1)}, \quad (10)$$

де  $y_{iu}$  – значення критерію оптимізації в паралельних дослідах (в  $u$ -му рядку);

$\bar{y}$  – середнє значення критерію оптимізації в паралельних дослідах в  $u$ -му рядку матриці плану;

$m$  – кількість повторностей одного дослідів (одного рядка матриці плану).

Перевірку на адекватність моделі проводили за критерієм Фішера  $F_{роз}$ . Модель є адекватною, якщо виконується умова:  $F_{роз} \langle F_{таб}$  [5], де  $F_{роз}, F_{таб}$  – розрахункове і табличне значення критерію Фішера, яке вибирається з табл. дод. 3 для рівня значущості 0,05 з числом степенів вільності чисельника  $f_u = N_p - d$ , знаменника  $f_z = N_p \cdot (m-1)$  [5, 7].

де  $d$  – кількість значущих коефіцієнтів.

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_{роз}$  визначаємо з відношення [6]:

$$F_{роз} = \frac{S_{ао}^2}{S_y^2}, \quad (11)$$

де  $S_{ао}^2$  – дисперсія адекватності;

Дисперсія адекватності  $S_{ао}^2$  визначається як [6]:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_p} (\hat{y}_u - \bar{y})^2}{N_p - d}, \quad (12)$$

де  $\hat{y}_u$  – розрахункове (за рівнянням регресії) значення параметра оптимізації.

**Висновки.** Запропонована методика експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора з використанням теорії планованого експерименту дає змогу встановити оптимальні значення досліджуваних факторів (площу поперечного перерізу, довжину тензовимірювальної площини, величину згинального моменту тензовимірювальної площини), підвищити достовірність результатів експерименту.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н. и др. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.
2. Раннев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений : учебник для вузов. 3-е изд., стер. Издательский центр «Академия», 2006. 336 с.
3. Дивин А.Г., Пономарев С.В., Мозгова Г.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. 108 с
4. Банга В.І. Матеріали V-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». ННЦ ІМЕСГ НААН України. Глеваха. 2016. URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (дата звернення 16.12.2016 р.)
5. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград: Колос, 1980. 163 с.
6. Львович Я. Е., Фролов В. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА. Москва: Радио и связь, 1986. 192 с.
7. Бондар А.Г., Статюха Г.А., Потяженко И. А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. Київ. Вища школа, 1980. 261 с.

**Банга В.І., к.т.н., Крупич О.М., к.т.н.**

Львовский национальный аграрный университет

#### **МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЯ МАССЫ КОМБИКОРМА В БУНКЕРЕ ДОЗАТОРА**

*В статье приведен обзор и анализ измерителей масс кормов, схему системы измерения и общий вид измерителя массы комбикорма в бункере дозатора, предусмотрено наличие средств для измерения, регистрации и передачи информации электрическими сигналами бегущих значений массы комбикорма в бункере дозатора в динамическом режиме, отображение и хранение информации и контрольно-измерительные приборы.*

*Подано експериментальную установку и методику экспериментальных исследований измерителя массы комбикорма с использованием теории многофакторного планируемого эксперимента, приведены уровни варьирования факторов, матрицу плана эксперимента, уравнения регрессии для определения выходного напряжения измерителя массы комбикорма в бункере дозатора от изменения усилия изгибающего момента тензоизмерительной плоскости.*

*Предложенная методика экспериментальных исследований измерителя массы комбикорма в бункере дозатора с использованием теории планируемого эксперимента позволяет установить оптимальные значения исследуемых факторов (площадь поперечного сечения и длину тензоизмерительной плоскости и величину изгибающего момента тензоизмерительной плоскости), повысить достоверность результатов эксперимента.*

**Ключевые слова:** измеритель массы, дозатор, комбикорм, экспериментальная установка, планируемый эксперимент, выходное напряжение, тензодатчик.

**Banha V.I., Ph.D., Krupych O.M., Ph.D.**

Lviv National Agrarian University

#### **METHOD OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MEASUREMENT OF COMBIQUE MASS IN THE BREAKING BOOKER**

*The article provides an overview and analysis of feed mass meters, a scheme of measurement systems and a general view of the mass of mixed feed in the hopper hopper, provides for the availability of means for measuring, recording and transmitting information by electric signals of running values of the mass of mixed feed in the hopper of the dispenser in a dynamic mode, displaying and storing information and control devices.*

*The experimental setting and the method of experimental studies of the mass of the mixed fodder meter using the theory of the multifactor planned experiment are given, the variance levels of the factors, the experiment plan matrix, the regression equation for determining the output voltage of the mass of the mixed fodder in the hopper of the dispenser from the change in the bending force of the tensile measuring plane are given.*

*The proposed technique of experimental studies of the mass of a mixed fodder in a hopper of a dispenser using the theory of the planned experiment allows us to determine the optimal values of the investigated factors (the area of the cross section and the length of the tensiometric plane and the magnitude of the bending moment of the tensiometric plane), to increase the reliability of the experimental results.*

**Key words:** *mass meter, dispenser, mixed fodder, experimental installation, planned experiment, output voltage, strain gauge.*

УДК 621.396.2

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-5>

Баховський П.Ф., к.т.н., М.М. Євсюк к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МОДЕЛЮВАННЯ НАДАННЯ ПОСЛУГ ЗА КОНЦЕПЦІЄЮ VTF

*Висвітлено окремі процеси моделювання надання послуг за концепцією VTF з урахуванням перспективних технологій і рекомендацій МСЕ. Виділено концепції надання додаткових послуг в мережах мобільних телекомунікацій. Наведені характеристики процесів функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою математичних моделей.*

**Ключові слова:** концепція VTF, імітаційне моделювання,

**Постановка проблеми.** Сьогодні якість надання послуг мобільними телекомунікаціями досить висока і може задовільнити практично більшість користувача. Проте, не дивлячись на значну різноманітність мобільних телекомунікацій, що надаються третім і четвертим поколіннями вони в принципі поки що не спроможні задовільнити нові вимоги які виникатимуть в найближчій перспективі. До них належить високошвидкісний обмін даними, висока місткість та пропускна спроможність, якість передачі мови і даних та глобальна місткість [4]. Вищесказане повною мірою відноситься і до завдань оцінки сценаріїв реалізації концепції VTF, які були вирішені в окремих публікаціях [1-3]. Як критерій оцінки будь-якого з цих сценаріїв був вибраний ступінь його задоволення якості реалізації послуг, яка представлена у відповідних рекомендаціях ITU-T. Для знаходження заданих у цих рекомендаціях величин була створена математична модель, що містить в собі ряд допущень. Дослідження характеристик процесів функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою математичних моделей часто приводить до отримання складних аналітичних виразів, які важко застосовні на практиці. Більш того, створювані математичні моделі звичайно містять в собі ряд спрощень, які можуть привести до зниження достовірності отримуваних результатів.

Вищесказане повною мірою відноситься і до завдань оцінки сценаріїв реалізації концепції VTF, які були вирішені аналітичними методами. Як критерій оцінки будь-якого з цих сценаріїв був вибраний ступінь задоволення якості реалізації послуг, яка представлена у відповідних рекомендаціях ITU-T. Для знаходження заданих в цих рекомендаціях величин була створена математична модель, що містить в собі ряд допущень.

Отримані математичні вирази для  $P(\gamma > t)$  і  $\bar{t}_1$  дозволяють оцінювати будь-який сценарій реалізації концепції VTF, порівнюючи його з відповідними нормами:  $P(\gamma > t_1^*) \leq P^*$  і  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_1^*$ .

З урахуванням вищесказаного, можемо зробити висновок про те, що разом з аналітичними методами можна використовувати методи імітаційного моделювання.

Завдання імітаційного моделювання реалізації послуг в рамках концепції VTF можна звести до постановки експерименту на ЕОМ, який дозволить за заданих умов визначити функціональні залежності  $P(\gamma > t) = f(t)$  та  $\bar{t} = f(p)$  умовної імовірності часу реалізації послуги і його середнього значення відповідно.

Отримані математичні вирази дадуть можливість оцінювати окремі сценарії реалізації концепції VTF, порівнюючи їх з відповідними нормами та вимогами.

**Аналіз останніх досліджень.** Використаємо методи імітаційного моделювання. Завдання імітаційного моделювання реалізації послуг у рамках концепції VTF можна звести до постановки програмного забезпечення, яке дозволить за заданих умов визначити функціональні залежності та умовної імовірності часу реалізації послуги і його середнього значення відповідно. Моделюванню піддавався процес реалізації послуг набору CS-1. Текст програми імітаційної моделі наведений у додатку [4].

У процесі імітаційного моделювання розглядаються наступні завдання:

– дослідження процесу реалізації послуг компонентами мереж мобільних телекомунікацій;

– отримання таких імовірно-часових характеристик, які дозволять проводити оцінку досліджуваного сценарію реалізації концепції *VTF* за заданими критеріями.

Процес реалізації *i*-ї послуги ініціюється надходженням заявки на цю послугу, тобто спрацьовуванням тригерної точки, і полягає у виконанні ланцюжка з *J* функцій (фаз), необхідних для її реалізації. Залежно від сценарію реалізації концепції *VTF*, кожна компонента обслуговуючого приладу – ОП, як домашньої (підтримуючої), так і візитної мережі, може брати участь у реалізації *i*-ї послуги, виконуючи певне число фаз.

У термінах класифікації Кендала-Башаріна [5], кожен ОП можна формалізувати записом загального вигляду:  $G/G/1$ , що означає довільний розподіл надходження числа заявок на кожен ОП, довільний час, що витрачається на обслуговування заявки, один прилад обслуговування, необмежене число місць для очікування в черзі і нескінченне число джерел заявок на обслуговування. Процес реалізації будь-якої послуги набору *CS-1* може містити в собі різне число фаз. При цьому в більшості випадків, *J* складає 3...13. У загальному випадку потік поступаючих заявок на кожен ОП є випадковим. Припустимо, що потік заявок на ОП від різних послуг, а також заявки пов'язані з надходженням вже існуючого навантаження, утворюють суму великого числа незалежних стаціонарних ординарних потоків, вплив кожного з яких в цій сумі надзвичайно малий. При цих допущеннях сумарний потік близький до простого. Даний факт, підтверджений рядом досліджень, проведених різними методами, дозволяє перейти до дослідження, з аналітичної точки зору, спрощеної моделі  $M/G/1$ , що означає простий вхідний потік заявок на обслуговування *M*, довільний час що витрачається на обслуговування заявки *G*, один прилад обслуговування, необмежене число місць для очікування в черзі і нескінченне число джерел навантаження. Перед кожним обслуговуючим приладом, що виконує *j*-у фазу реалізації *i*-ї послуги утворюється черга, в яку надходять заявки не тільки від *i*-ї послуги, але й від інших послуг, а також заявки, пов'язані з надходженням вже існуючого навантаження.

З урахуванням вищесказаного, при написанні програми імітаційної моделі використані наступні початкові дані:

– генерація потоку заявок від *i*-ї послуги, від інших послуг, а також заявки пов'язані з надходженням вже існуючого навантаження, що здійснюється за допомогою давача псевдовипадкових чисел, що рівномірно розподілені в інтервалі: 0, 1;

– час обслуговування заявки в ОП задається за допомогою давача псевдовипадкових чисел, рівномірно розподілених в заданому інтервалі.

– дисципліна обслуговування заявок *S* без пріоритету;

– моделювання проведено за умови, що всі ОП мають однакове навантаження – *p*;

– на кожному ОП, окрім першого, виконується по одній фазі реалізації *i*-ї послуги;

– на першому ОП виконується дві фази реалізації *i*-ї послуги (перша й остання).

Як показано раніше, процес реалізації будь-якої послуги набору *CS-1* може містити в собі різне число фаз. При цьому в більшості випадків, *J* складає 3...13.

Перед кожним обслуговуючим приладом, що виконує *j*-у фазу ( $j = \overline{1, J}$ ) реалізації *i*-ї послуги ( $i = \overline{1, I}$ ), утворюється черга, в яку поступають заявки не тільки від *i*-ї послуги, але й від інших послуг, а також заявки, пов'язані з надходженням вже існуючого навантаження.

Результати імітаційного моделювання при числі фаз реалізації послуги  $J = 3...13$  і завантаженнях ОП  $p = 0,5 - 0,9$ , представлені на рис.1. у вигляді залежностей  $P(\gamma > t) = f(t)$  та  $\bar{t} = f(p)$ .

Отримані залежності дозволяють оцінювати досліджуваний сценарій реалізації концепції віртуального домашнього оточення, порівнюючи його з відповідними нормами:  $P(\gamma > t_1^*) \leq P^*$  і  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_1^*$ .

Зіставимо результати імітаційного моделювання і результати, отримані в розділі 3 [4].

Ці два методи визначення залежності  $P(\gamma > t) = f(t)$  для практики мають задовільну розбіжність (не більше 10%) [4] при  $p = 0,5...0,8$   $J = 3...13$  і  $t = 0...55$  одиниць модельного часу. Результати імітаційного моделювання і результати, приведені на рис.1 для визначення залежності  $\bar{t} = f(p)$ , мають задовільну для практики розбіжність при завантаженні всіх ОП від 0,5 до 0,7 і числі фаз реалізації послуги від 3 до 11.

Відсутність повного збігу результатів, отриманих аналітичними методами і методом імітаційного моделювання, пояснюється тим, що при побудові моделей в тому і другому випадках були зроблені різні допущення. Тому для оцінки сценаріїв реалізації концепції *VTF* доцільно використовувати разом з аналітичними методами також і розроблену імітаційну модель.

Окремі фрагменти результатів імітаційного моделювання при визначенні числа фаз реалізації послуги і навантаженнях ОП, представлені на рис.1 у вигляді сформованих залежностей.

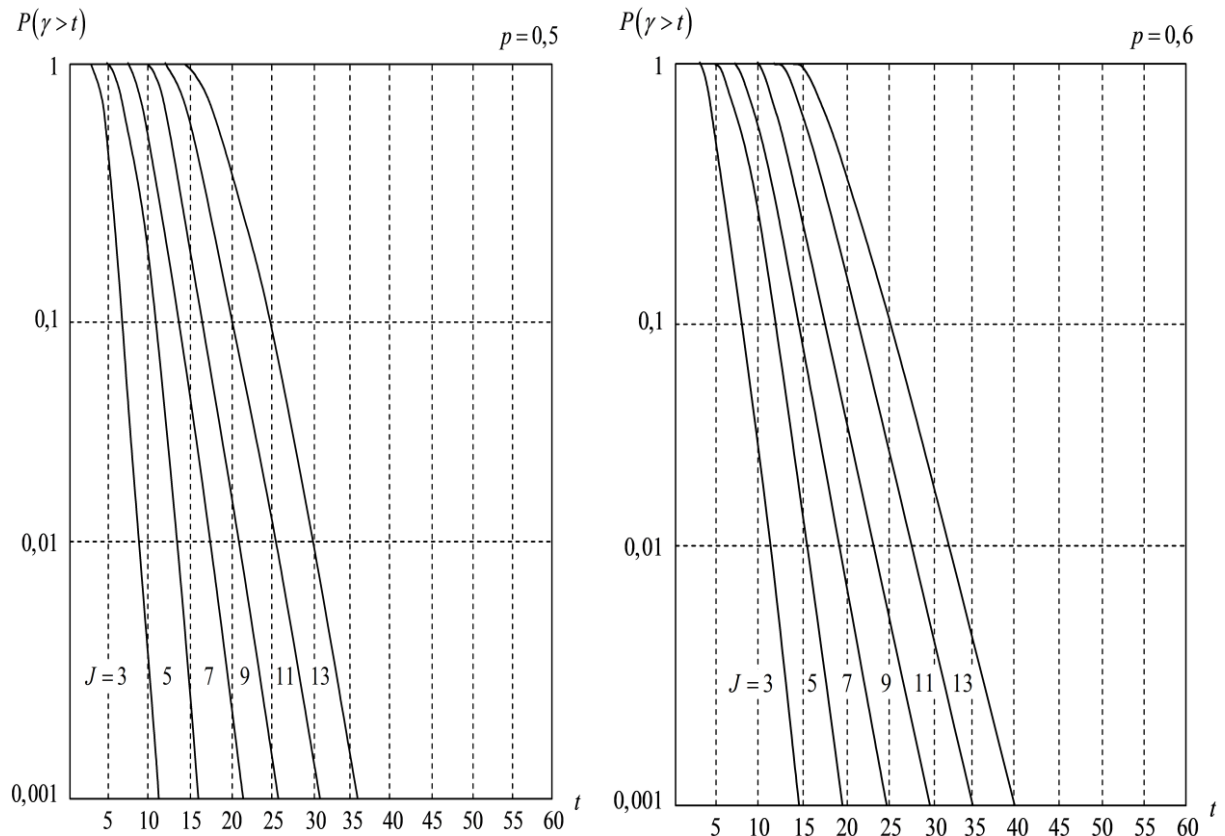


Рис. 1. Функція розподілу

Отримані залежності дозволяють оцінювати досліджуваний сценарій реалізації концепції віртуального домашнього оточення, порівнюючи його з відповідними нормами.

Результати імітаційного моделювання отримані в розділі 3 [4].

Методи визначення залежності для практики мають задовільну розбіжність (не більше 10%) при заданому числі одиниць модельного часу. Результати імітаційного моделювання для визначення залежності, мають задовільну для практики розбіжність при завантаженні всіх ОП від 0,5 до 0,7 і числі фаз реалізації послуги від 3 до 11.

Відсутність повного збігу результатів, отриманих аналітичними методами і методом імітаційного моделювання, пояснюється тим, що при побудові моделей в першому і другому випадках були зроблені різні допущення, тому для оцінки сценаріїв реалізації концепції *VTF* доцільно використовувати разом з аналітичними методами також і розроблену імітаційну модель.

**Висновки.** 1. Опрацьована математична модель реалізації послуг у рамках концепції *VTF*, яка дозволяє оцінити ступінь задоволення споживача якістю послуг, які можуть надаватися в рамках концепції.

2. Отримані вирази для оцінки часу, який витрачається на доставку заявок між компонентами мереж мобільних телекомунікацій четвертого покоління, що беруть участь в реалізації концепції *VTF*.



3. Зіставлення розрахункових і експериментальних результатів показує, що при оцінці варіантів структурно-функціональної побудови концепції VTF можливе використання аналітичного методу або методу імітаційного моделювання, а також їх поєднання.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Застосування моделі Ерланга до аналізу обміну даними у системах мобільного зв'язку. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. Міжнародна науково-технічна конференція НТУУ КПІ. – Київ, 2014. – С. 152-155).

2. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Кількісний опис виграшу за рахунок м'якого автоматичного перемикавання секторів у висхідній радіолінії систем мобільного зв'язку // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. Міжнародна науково-технічна конференція НТУУ КПІ. – Київ, 2015. – С. 151-153).

3. Баховський П.Ф., Євсюк М.М. Окремі методи підвищення використання потоків у мобільних телекомунікаційних мережах. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. Міжнародна науково-технічна конференція НТУУ КПІ. – Київ, 2016. - с. 132-134.

4. Баховський П.Ф. Матеріали дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Методи забезпечення якості сервісу при впровадженні віртуальних технічних функцій в мобільних телекомунікаційних мережах». Українська державна академія залізничного транспорту.// Харків-2010.

5. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания [Текст] /Б.В Гнеденко, И.Н. Коваленко.- М.: Наука, 1987. – 336с.

**П.Ф. Баховский, Н.Н. Евсюк**

Луцкий национальный технический университет

#### **ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЙ**

*Изложены отдельные аспекты развития систем мобильной связи с учетом перспективных технологий и рекомендаций МСЭ. Рассмотрены преимущества и недостатки некоторых сценариев реализации концепции VTF. Приведены основополагающие замечания относительно технических характеристик внедренных проектов построения сетей мобильных телекоммуникаций, с учетом потенциальных возможностей внедрения любого сценария реализации виртуальных технических функций за заданным качеством в сетях проекта SAE / EPS. Обобщены концепции предоставления дополнительных услуг в сетях мобильных телекоммуникаций: узлов услуг (Service nodes); «классической» интеллектуальной сети связи IN.*

**Ключевые слова:** системы мобильной связи, сети мобильных телекоммуникаций, проект SAE / EPS.

**P. Bakhovskiy, M. Yevsiuk**

Lutsk National Technical University

#### **SPECIFIC ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF MOBILE TELECOMMUNICATIONS NETWORK**

*Some aspects of the development of mobile communication systems are considered in the light of advanced technologies and recommendations of ITU. The advantages and disadvantages of some scenarios for implementing the concept of VTF are considered. The basic comments on the technical characteristics of the implemented projects for the construction of networks of mobile telecommunications are given, taking into account the potential possibilities of implementing any scenario for the implementation of virtual technical functions with the given quality in the networks of the SAE / EPS project. Two concepts of provision of additional services in the networks of mobile telecommunications are highlighted: service nodes (Service nodes); "Classical" intelligent communication network IN.*

**Keywords:** mobile communication systems, mobile telecommunication networks, SAE / EPS project.

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-6>

Відринський Б. В., асп., Замуруєва О.В., к.ф.-м.н.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

### ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ (Nd, Dy, Er, Lu) НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ $A^{IV}B^{VI}$

У роботі встановлено вплив легування рідкоземельними елементами (Nd, Dy, Er, Lu) кристалів, на їх оптичні, нелінійно-оптичні властивості. З експериментальних результатів визначена  $E_U$ : 95, 91, 98, 87 меВ для  $AgGaGe_3Se_8:Nd$ ;  $AgGaGe_3Se_8:Dy$ ;  $AgGaGe_3Se_8:Er$ ;  $AgGaGe_3Se_8:Lu$  відповідно. Представлена оцінка ширини забороненої зони для усіх сполук при кімнатній температурі. Досліджено генерацію другої гармоніки, за допомогою методики порошку Куртца-Перр, що дає відносну оцінку ефективності нелінійно-оптичних перетворень. Наближення частинки порошку вважаються монокристалами з близькими розмірами до 100 мкм.

**Ключові слова:** ширина забороненої зони, енергія Урбаха, генерація другої гармоніки, метод порошкового тестування Куртца-Перрі.

**Постановка проблеми.** Великі успіхи, досягнуті в розвитку фізики і хімії твердого тіла, а також багатьох галузей техніки, в значній мірі обумовлені створенням нових речовин з наперед заданими властивостями. Спектр речовин для цих потреб, окрім традиційних кремнію, германію і їх бінарних ізоелектронних аналогів, багатьох оксидних фаз, суттєво урізноманітнюється за рахунок складних тернарних і тетрарних сполук, що містять у своєму складі халькогени. Це обумовлює значне розширення області прозорості матеріалу до далекої ІЧ області спектрального діапазону, компенсуючи цей недолік оксидних матеріалів.

Маючи велику анізотропію та широку область пропускання світла, а також значно більшу поляризованість атомів халькогенів і галогенів в порівнянні з атомами кисню, ці речовини є особливо перспективними в багатьох областях напівпровідникової техніки з використанням нелінійних, електрооптичних і електричних характеристик матеріалу.

Тетрарні халькогенідні сполуки  $AgGaGe_3Se_8$  леговані рідкоземельними елементами (Nd, Dy, Er, Lu), є новими і практично недослідженими речовинами, які можуть бути перспективними матеріалами нелінійної оптики, електронної і оптоелектронної техніки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження кристалів групи  $A^{IV}B^{VI}$  ведуться досить широко і присвячені питанням розробки технології синтезу і вирощування високоякісних монокристалів зазначеного класу, їх різних фізичних властивостей, причому в значній частині досліджень вивчається природа структурних фазових переходів, які реалізуються в цих кристалах при зниженні температури.

Активно досліджується вплив дефектно-домішкової підсистеми кристалів на специфіку їх фізичних властивостей і особливості фазових переходів.

**Виділення невирішеної проблеми.** Разом з тим, відомостей про вплив легуючих домішок на властивості таких матеріалів недостатньо. У зв'язку з цим **метою даної роботи** стало встановлення впливу легування рідкоземельними елементами (Nd, Dy, Er, Lu) кристалів групи  $A^{IV}B^{VI}$  на їх оптичні, нелінійно-оптичні властивості.

**Результати дослідження.** Один з найважливіших параметрів напівпровідників, від якого залежать оптичні властивості є ширина забороненої зони. Для оцінки ширини забороненої зони нами проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання в області краю смуги власного поглинання. Для проведення вимірювань використовувались пластини товщиною 0,06-0,1 мм з плоскопаралельними поверхнями оптичної якості. Пластини були відполіровані в касторовому маслі, що містить надтонкі добавки абразиву (розміром частинок близько 28 мкм) для отримання високоякісних оптичних поверхонь. У якості спектрального приладу використовувався дифракційний монохроматор МДР – 206 з кремнієвим фотодіодом для діапазону 360-1100 нм (спектральний дозвіл 0,2 нм). Результати проведеного дослідження представлено на рис.1.

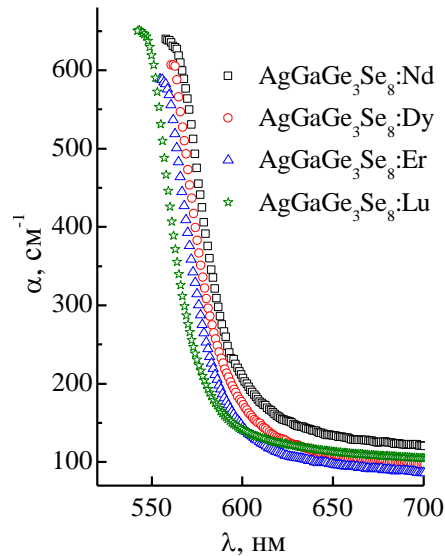


Рис.1. Спектральний розподіл коефіцієнта поглинання при T=300К.

В області краю поглинання частотна залежність коефіцієнта поглинання світла добре описується експоненціальною залежністю, яка є характерною для правила Урбаха [1]:

$$\alpha(h\nu, T) = \alpha_0 \exp\left[\frac{h\nu - E_0}{E_u(T)}\right],$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла,  $\alpha_0$  – стала, яка залежить від якості зразка,  $E_0$  – параметр близький до ширини забороненої зони при  $T = 0$  К,  $E_u$  – енергія Урбаха, яка рівна енергетичній ширині області краю поглинання і є мірою розупорядкування матеріалу. З експериментальних результатів  $E_u$  визначена як  $E_u = \Delta(h\nu) / \Delta(\ln \alpha)$  та становить 95, 91, 98, 87 меВ для  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Nd}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Dy}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$  відповідно.

Слід зауважити, що при вимірюванні спектрів поглинання не вдалось отримати значення  $\alpha > 1000 \text{ cm}^{-1}$ , що в свою чергу не дозволило використати метод Тауца для розрахунку  $E_g$ . Тому наближене значення ширини забороненої зони розраховувалось використовуючи правило Урбаха за співвідношенням  $E_g = E_0 + E_u \ln(1000/\alpha_0)$ . Результати оцінки ширини забороненої зони представлено на рис.2.

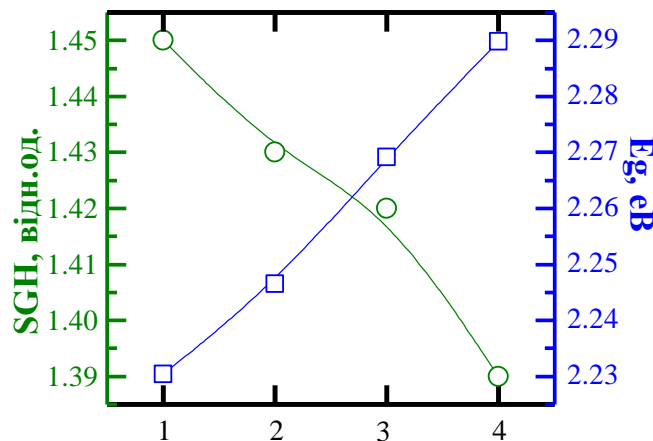


Рис.2. Результати оцінки ширини забороненої зони та генерації другої гармоніки кристалів: 1 –  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Nd}$ ; 2 -  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Dy}$ ; 3 -  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ ; 4 -  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$ .

Особливістю структури досліджуваних кристалів є статистичний розподіл катіонів (Ag, Nd/Dy/Er/Lu) по вузлах кристалічної ґратки і наявність в сполуці  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  нестехіометричних вакансій атомів Ag ( $V_{\text{Ag}}$ ) [2]. Зменшення ширини забороненої зони досліджуваних сполук пов'язано зі знаком різниць іонних радіусів компонент сполуки та заміщуючого іона ( $\text{Nd}^{+3}(0,099 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Dy}^{+3}(0,088 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Er}^{+3}(0,085 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Lu}^{+3}(0,080 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ) [3]. Додатковий внесок у зміну ширини забороненої зони можуть також вносити точкові дефекти вакансійного та міжвузлового типів. При введенні атомів із меншим іонним радіусом кристалічна ґратка стискається, що викликає зменшення параметрів решітки. Зміна параметрів решітки призводить до зміни ступеня перекриття електронних оболонок сусідніх атомів, і, як наслідок, до зміни ширини забороненої зони. Дане твердження добре узгоджується з експериментами по гідростатичному стиску кристалів, а саме, об'ємний гідростатичний тиск призводить до зменшення міжатомної відстані та збільшення  $E_g$ . Вплив об'ємного гідростатичного тиску на структурні і електронні властивості халькогенідних кристалів змодельовано в роботах [4, 5].

Вимірювання ГДГ виконували за допомогою методики порошку Куртца-Перрі [6]. Умови застосування даного методу проаналізовані в роботі [7]. Потрібно зазначити, що метод Куртца-Перрі дає відносну оцінку ефективності нелінійно-оптичних перетворень, використовуючи лише порошок нелінійно-оптичного кристалу. Цей метод дає можливість досліджувати нові перспективні НЛЮ матеріали, проте в ньому використовуємо наступні наближення – частинки порошку вважаються монокристалами з близькими розмірами до 100 мкм, які хаотично орієнтовані в просторі. Водночас кристали рівномірно розподілені між пластинками. Розмір зерен у порошку, що отримані внаслідок механічного та акустичного дроблення, оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа. Вони становили 100–300 мкм. Результати оцінки інтенсивності генерації другої гармоніки представлено на рис. 2. Згідно проведених експериментів та аналізу отриманих результатів видно, що інтенсивність ГДГ зменшується зі збільшенням ширини забороненої зони, що добре узгоджується з даними роботи [8].

**Висновки.** Досліджено спектральний розподіл коефіцієнта поглинання при  $T=300\text{K}$  для сполук групи  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  легуваних рідкоземельними елементами (Nd, Dy, Er, Lu), а саме:  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Nd}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Dy}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$ . Показано, що зменшення ширини забороненої зони досліджуваних сполук пов'язано зі знаком різниць іонних радіусів компонент сполуки та заміщуючого іона ( $\text{Nd}^{+3}(0,099 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Dy}^{+3}(0,088 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Er}^{+3}(0,085 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ;  $\text{Lu}^{+3}(0,080 \text{ нм}) \rightarrow \text{Ag}^+(0,113 \text{ нм})$ ).

За допомогою методу порошкового тестування Куртца-Перрі досліджено генерацію другої гармоніки, що дає відносну оцінку ефективності нелінійно-оптичних перетворень, використовуючи лише порошок нелінійно-оптичного кристалу.

#### Інформаційні джерела

1. V.L. Bonch-Bruyevich, I.P. Zvyagin, R. Kaiper, A.G. Mironov, R. Enderline, B. Esser, *Electron Theory of Disordered Semiconductors*, Nauka, Moscow, 1981.
2. Photovoltaic, photoelectric and optical spectra of novel  $\text{Ag}_x\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_2$  ( $0.167 > x > 0.333$ ) quaternary single crystals / G. Lakshminarayana, M. Piasecki, G. E. Davydyuk, G. L. Myronchuk, O. V. Yakymchuk, O. V. Parasyuk, I. V. Kityk. *Mater. Chem. Phys.* 2012. Vol. 135, № 2–3. P. 837–841.
3. Справочник по общей и неорганической химии / А.Ф.Гусева, Е.В.Закс // Екатеринбург. 2001. 39с.
4. Specific features of band structure and optical anisotropy of  $\text{Cu}_2\text{CdGeSe}_4$  quaternary compounds. M. G. Brik, O. V. Parasyuk, G. L. Myronchuk, I. V. Kityk. *Mater. Chem. Phys.* 2014. Vol. 147, № 1–2. P. 155–161.
5. Photoinduced features of energy band gap in quaternary  $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$  crystals / M. G. Brik, I. V. Kityk, O. V. Parasyuk, G. Myronchuk. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2013. Vol. 25. P. 505802 (11pp).
6. Kurtz S. K., Perry T. T. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials. *J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 39. P. 3798–3813.
7. Second harmonic generation by micropowders: a revision of the Kurtz–Perry method and its practical application / I. Aramburu, J. Ortega, C. L. Folcia, J. Etxebarria. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics.* 2014. Vol. 116, № 1. P. 211–233.

8. Synthesis, structure, and properties of  $\text{Li}_2\text{In}_2\text{MQ}_6$  ( $\text{M} = \text{Si, Ge; Q} = \text{S, Se}$ ): a new series of IR nonlinear / Wenlong Yin, Kai Feng, Wenyu Hao, Jiyong Yao, and Yicheng Wu. Opt. Mat. Inorg. Chem. 2012. Vol. 51. P. 5839–5843.

**Видрынський Б.В., Замуруєва О.В. к.ф.-м.н.**

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ (Nd, Dy, Er, Lu) НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$**

*В работе установлено влияние легирования редкоземельными элементами (Nd, Dy, Er, Lu) кристаллов  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ , на их оптические, нелинейно-оптические свойства. Из экспериментальных результатов определена  $E_U$ : 95, 91, 98, 87 меВ для  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Nd}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Dy}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$  соответственно. Представленная оценка ширины запрещенной зоны для всех соединений при комнатной температуре. Исследована генерация второй гармоники, с помощью методики порошка Куртца-Перри, что дает относительную оценку эффективности нелинейно-оптических преобразований. Приближение частицы порошка считаются монокристаллами с близкими размерами до 100 мкм.*

**Ключевые слова:** ширина запрещенной зоны, энергия Урбаха, генерация второй гармоники, метод порошкового тестирования Куртца-Перри.

**Vidrynsky B.V., Zamurujeva O.V. Cand. Sc. (Phys.-Math.)**

Lesya Ukrainka Eastern European National University

**EFFECT OF ALLOYING BY RARE-EARTH ELEMENTS (Nd, Dy, Er, Lu) ON THE OPTICAL PROPERTIES OF  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  CRYSTALS**

*The paper establishes the effect of doping with rare earth elements (Nd, Dy, Er, Lu) crystals on their optical, nonlinear optical properties. From experimental results determined  $E_U$ : 95, 91, 98, 87 meV для  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Nd}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Dy}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ ;  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$  respectively. Presented an estimate of the band gap for all compounds at room temperature. The generation of the second harmonic is investigated using the method of Kurtz-Perry powder, which gives a relative estimate of the efficiency of nonlinear optical transformations. Approximation of the powder particles are considered single crystals with similar sizes to 100  $\mu\text{m}$ .*

**Keywords:** band gap, Urbach energy, second harmonic generation, Kurtz-Perry powder testing method.

UDC 621.91.01:681.3.01:004.4

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-7>

O.V. Voloshko Assistant, S. P. Vysloukh Ph.D. Assoc. Prof.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## RESEARCHING OF DETAIL'S CONSTRUCTION WITH METHOD OF FINAL ELEMENTAL ANALYSIS

*The advantages of using computer modelling for the study of the detail's elastic-deformed state during the process of its operation are given. It is proposed to use the method of finite elements for such researches. It is shown that FEMAP is an effective software environment based on finite element analysis. An example of using the finite element method for modelling the detail's elastic state operating in conditions of alternating loads is given.*

**Key words:** *computer modelling, finite element analysis, stress-deformed detail state, system of engineering analysis of FEMAP*

**Introduction.** At the present stage of the development of instrument making, the work of many engineers, technologists, and scientists in this field is aimed at improving the detail's performance characteristics in the process of its use. These detail's characteristics are formed during its producing. Therefore, the technological process of detail's manufacturing with the choice of rational methods of its processing, which provides the necessary parameters of the treated surfaces' quality with its maximum productivity or minimum cost, is advanced to the foreground.

Modern instrument and machine-building production is characterized by the use of a wide range of structural materials, which differ in physical and mechanical properties, which significantly affect the detail's performance characteristics.

To increase the productivity of technological processes of detail's producing with specified characteristics and to ensure the effectiveness of used equipment is possible by solving optimization problems on the basis of mathematical modelling. This will provide details with the necessary physical and mechanical parameters.

Computer modelling is one of the effective methods for studying the state of any objects. Computer models are simple and convenient for computing experiments. Computer modelling gives you the opportunity to explore objects in dynamics. At the same time, it is possible to control the researching duration, to carry out repeated tests of the initial model, to receive various characteristics of the object in numerical or graphical form, to find the optimal design solution without the production of prototype samples. In computer modelling, the method of finite elements is used, the method of finite difference, the method of node potentials, etc. [1].

The use of finite element method for today is actually the world standard for calculation of detail's construction. The main advantage of this method is its versatility, which allows using a single method to perform studies of the detail's state with different materials' properties. The flexibility of the finite element method provides a multivariate method for construction's modelling [1].

The main idea of finite element method is that any continuous value such as temperature, pressure, displacement, etc., can be approximated by a discrete model, which will be based on the set of piecewise continuous functions defined on the finite number of sub-regions. Bulk-continuous functions are determined by means of values of a continuous value in the finite number of points in a given region.

A discrete model is easy to construct if it is first assumed that the numerical values of the specified parameters in each inner region are known. Then you can go to the general case. Consequently, when constructing a discrete continuous-dimensional model, proceed as follows [2]:

- in this area, the finite number of points is fixed. These points are called nodal points or nodes;
- the value of a continuous value at each point is considered as a variable to be determined;
- the area of definition of continuous value is divided into a finite number of areas, which are called elements. These elements have common nodal points and in aggregate approximates the shape of the region;
- the continuous value is approximated on each element by a polynomial, which is determined by the nodal values of this value.

For each element it is determined by its polynomial, but the polynomials are selected in such a way that the continuity of the quantity along the elements of the element is maintained. The choice of

the form of elements and their functions for specific tasks determines the accuracy of an approximate solution and depends on the inventiveness and skill of the researcher.

Therefore, the finite element method is a universal tool for analyzing the detail's state and, among many CAD / CAM / CAE models, the software package for finite element analysis, is important.

The modern progressive software environment for solving the engineering analysis tasks is FEMAP, which allows the creation of finite element models of components, complex products and systems, and perform the analysis of the results. FEMAP helps to clearly present a pattern of behaviour of the product under investigation [3].

#### **Target of the work**

The purpose of this work is to use the FEMAP system to create a finite element model of a detail which works in difficult operating conditions, to perform a study of its state of the parameters, to obtain a clear picture of the behaviour of the investigated structure and to perform an analysis of the results.

Generators of FEMAP grids, due to the large library of finite elements of the required form, allow creating high-quality finite elemental grids and obtaining accurate results of the solution [4]. FEMAP gives you the ability to control all grid generation parameters, such as grid step, grid creation for small details, growth rates, and accounting for small geometric elements. When complex geometry is often required modification of the grid in those areas where there should be a special accuracy of the calculation. The FEMAP Meshing Toolbox allow you to perform this modelling by changing the grid step parameters in the source model interactively. In this case, the grid will be updated automatically. In addition, by modifying the grid, using the graphic scale you can immediately analyse the quality of the created finite elements to make sure that the resulting element model satisfies the quality criteria [5].

#### **Main part**

In order to perform computer modelling, the detail "rocker" with a length of 155 mm, a maximum width of 30 mm and a height of 9.5 mm was selected. The detail has an axial hole with a diameter of 6.1 mm. It is made of steel 40X DSTU 7806: 2015, operates under difficult conditions of alternating loads.

The initial stage of the calculation of the element of construction, which includes the detail, is an analysis of its geometry, load conditions, material properties and the creation of a calculation model. The calculation model is a definite approximation to the real kind of detail from the material of its manufacture and the specified operating conditions. It allows performing a numerical calculation of the detail's construction based on its geometry, material, initial and boundary conditions.

The drawing of the researched detail in the FEMAP software system began with the definition of the coordinates of the "finite and transitive" points of this detail and their introduction into the program. After applying these points to the drawings, they were connected by lines, which allowed obtaining a two-dimensional detail's drawing. Then the boundary surface is constructed using the "Geometry → Boundary Surface → From Curves ..." command. From the constructed boundary surface, a solid detachment was obtained using the command Geometry → Solid → Extrude. In the future, using the same command rounded the edges of the part and made holes in the required places

Figure 1 shows the built-in geometric model of the detail «rocker».

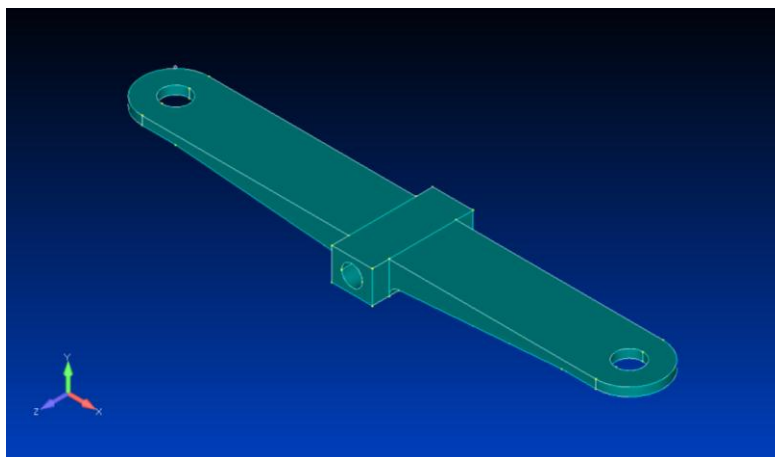


Fig. 1. Geometric model of the detail

To create a finite-element model for the information entered earlier, the command «Model → Material ...» added the necessary characteristics of the material from which the detail was made.

The list of characteristics introduced includes all the necessary values of its physical and mechanical properties: Poisson's coefficient, material density, Young's modulus, and others. To create a finite-element grid based on the created "solid" body, the command "Mesh → Geometry → Solids ..." was used. It calls the Automesh Solids dialog box, which selected the previously created properties of the elemental grid, and installed the "Midside Nodes" option, which creates intermediate KA nodes to approximate the geometry of the body. This allows for almost precise approximation of the curvilinear surfaces, which provides a more precise solution to the issue, but leads to a significant increase in the required disk volume and RAM and time to solve the issue. By pressing the "OK" button, the generation of the elemental grid was completed, the result of which is shown in Figure 2.

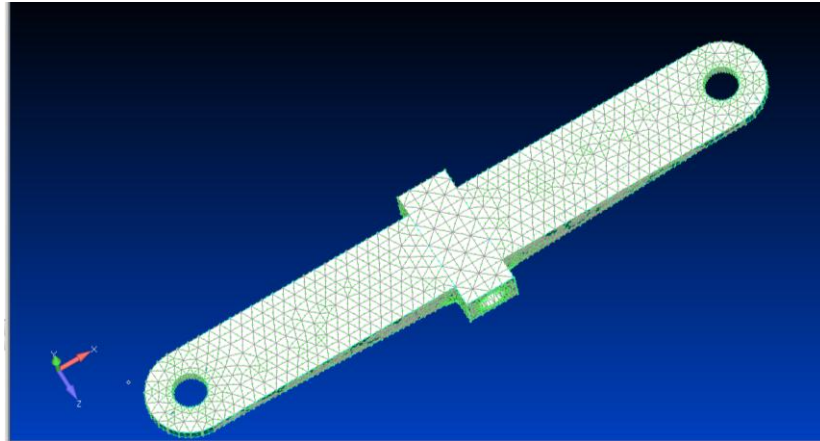


Fig. 2. Finite-element detail's model

At the next stage of the research of the detail's construction set the boundary conditions in the form of consolidations and loads. To do this, using the Model → Constraint → New Constraint Set tab, a new set of constraints was created. In the New Constraint Set dialog box in the Title column, the name of the fixation method was entered and the input was confirmed by pressing the OK button. Continuation of the research process is done by pressing the "Done" button.

The output of the standard object dialog box was executed by the commands «Model → Constraint → On Surface ...», and the choice with «Entity Selection - Enter Surface (s) to Select» commands. The choice of the fixing surface of the details was performed in the "Create Constraints on Geometry" dialog box in the "Advanced Types" section (Fig. 3). In the Create Constraints on Geometry constraints dialog, pressing button Fixed set the hard fix and confirmed it by pressing the "OK" and "Cancel" buttons.



Fig. 3. Solid-state detail's model with a definite way of fixing it

A set of loads for the item was created by the command Model → Load → New Load Set, and in the New Load Set dialog in the section Title entered the name of the load set and confirmed this action by pressing the buttons "OK" and "Done".



The "Model → Load → On Surface ..." commands caused the standard "Entity Selection" object selection dialog box to indicate the load-transfer planes on the rocker and confirmed by pressing the "OK" button. The finite-element detail's model with the load transfer planes indicated on it are shown in Figure 4.

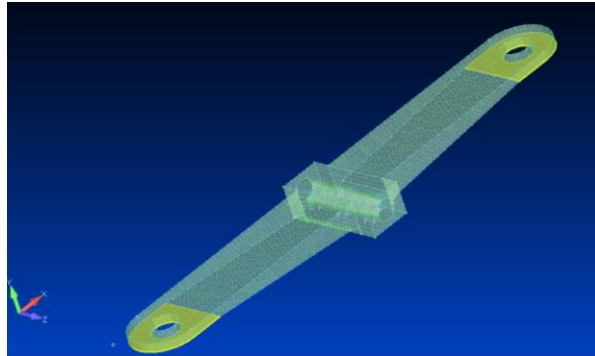


Fig. 4. Finite-element detail's model with the load-bearing planes indicated on it

In the dialog box of tasking loads Create Loads on Surfaces, values of the load were entered in the FY column, confirmation of the correct entry of the required value by the "OK" button and exit - by the "Cancel" button.

An analysis of the detail's stressed state with a given load was performed using the commands «Model → Analysis → New ...». In the dialog that appears, enter the name of the analysis (Title), select the analytics program (Analysis program) and specify the type of analysis (Analysis type). After that, clicking on the "Analyze" button launched the final-element- analysis procedure for execution.

The results of the graphic view of the stressed-deformed state of the detail were obtained by pressing the "Select a Contour View" button. The reflection of equivalent stresses for the Mises hypothesis for bulk finite-element models in the form of a colour diagram was obtained on the right side of the graphical interface of the program. The final-element model of the detail with the displayed stress-deformed state is shown in Figure 5.

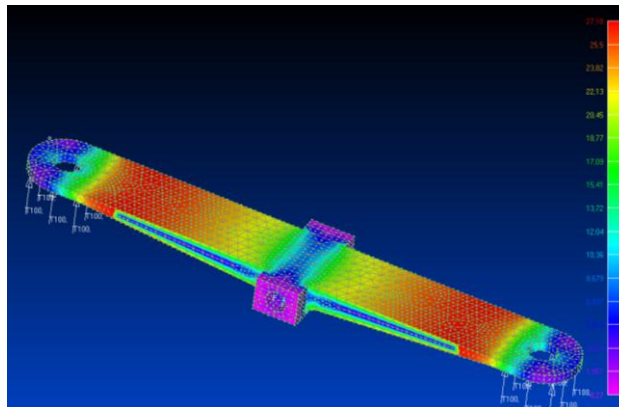


Fig. 5. Finite-element detail's model

The system allows you to view the stress values in each particular detail area using the "Select a Criteria View" button (Fig. 6).

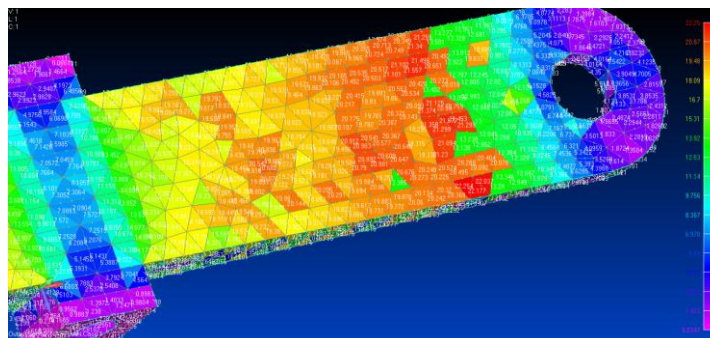


Fig. 6. The values of the stresses of the detail in the place of loads' application

In addition, the FEMAP system allows you to obtain textual information about the results of a finite element analysis.

The results of the modelling of the stressed state of the detail allowed to determine the localization location and the values of strains and deformations that arise during the detail's operation in the assembly unit.

### Conclusions

The given example of the FEMAP system using allowed to evaluate the construction of the detail "rocker" and to identify the most stressed areas and potential deformations that may occur directly in the detail's operation in the assembly unit.

The use of the FEMAP system at the stage of designing the assembly unit allows for accurate calculations of the state of each component of the product during its operation without conducting experiments. This makes it possible to reduce the cost of production for the production of experimental samples, conducting experiments, etc. Also, at the design stage of the assembly unit, it is possible to identify problem nodes of the product, make changes to its design, the parameters of individual parts, change the material from which the component is produced, etc. to ensure maximum reliability of the product as a whole.

### Information sources

1. Пасічник О.А. Технології комп'ютерного проектування та моделювання напружено-деформованого стану. Вісник Хмельницького національного університету, №3, 2016 (237) – С. 172–175.

2. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с.

3. Волошко О.В., Вислоух С.П. Комп'ютерне моделювання параметрів поверхневого шару деталей. // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського м. Київ, 2018. С. 63-64.

4. Барандич К.С., Вислоух С.П. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)/ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.– Вип. 2 (41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 228-232

5. Волошко О.В., Вислоух С.П. Моделювання пружного стану деталі засобами системи FEMAP. // Збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» м. Луцьк – 2018 р. – С. 20–21.

**Волошко О.В., асистент, Вислоух С. П., к.т.н., доцент**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДЕТАЛІ МЕТОДОМ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ

*Наведено переваги використання комп'ютерного моделювання для дослідження пружно-деформований стан деталі в процесі її експлуатації. Запропоновано для таких досліджень використовувати метод скінченних елементів. Показано, що ефективним програмним середовищем, яке базується на кінцево-елементному аналізі, є система FEMAP. Наведено приклад використання методу скінченних елементів для моделювання пружного стану деталі, що працює в умовах знакозмінних навантажень.*

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, кінцево-елементний аналіз, напружено-деформований стан деталі, система інженерного аналізу FEMAP.

**Волошко О.В., ассистент, Выслоух С. П., к.т.н., доцент**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

*Приведены преимущества использования компьютерного моделирования для исследования напряженно-деформированного состояния детали в процессе ее эксплуатации. Предложено для таких исследований использовать метод конечных элементов. Показано, что эффективной программной средой, основанной на конечно-элементном анализе, является система FEMAP. Приведен пример использования метода конечных элементов для моделирования упругого состояния детали, которая работает в условиях знакопеременных нагрузок*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние детали, система инженерного анализа FEMAP.

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-8>

Галян<sup>1</sup> В.В., Іващенко<sup>2</sup> І.А., Олексеюк<sup>2</sup> І.Д., Федосов<sup>1</sup> С.А., Третяк<sup>1</sup> А.П., Данилюк<sup>3</sup> І.В., Лебедь<sup>4</sup> О.О., Кевшин<sup>1</sup> А.Г., Тищенко<sup>2</sup> П.В.

<sup>1</sup>Кафедра експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна;

<sup>2</sup>Кафедра неорганічної та фізичної хімії, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна;

<sup>3</sup>Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна

<sup>4</sup>Кафедра хімії та фізики, Національний університет водного господарства та природокористування

### МЕХАНІЗМ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ МОНОКРИСТАЛУ $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

Монокристал  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  вирошений методом розчину-розплаву і опромінений  $\gamma$ -променями дозою 420, 1260, 2520, 5040 Гр з допомогою джерела  $^{60}\text{Co}$ . Зафіксовано інтенсивне люмінесцентне випромінювання в інтервалах 1,48 – 1,61 і 0,75 – 0,86 еВ при збудженні лазером із довжиною хвилі 532 нм. Побудовано діаграму енергетичних рівнів для іонів Ербію та встановлено механізм випромінювання, в якому важливу роль відіграє процес кросрелаксації. При високих дозах опромінення (2520, 5040 Гр) відбувається збільшення інтенсивності люмінесцентного випромінювання, яке пов'язується із ростом концентрації  $\gamma$ -індукованих дефектів кристалу.

**Ключові слова:** фотолюмінесценція, кросрелаксація, спектр поглинання.

#### Вступ

Отримання нових матеріалів і дослідження їх властивостей є одним із основних напрямків сучасного матеріалознавства. Введення до бінарних, тернарних сполук [1-3] легуючих домішок, зокрема рідкісноземельних металів [4-6], створює передумови для виготовлення активних і пасивних середовищ в лазерній техніці та телекомунікаціях. Крім того, особливу увагу науковці приділяють властивостям кристалічних та аморфних середовищ, які здатні стабільно проявляти фотолюмінесценцію (ФЛ) високої інтенсивності та нелінійно-оптичні властивості під впливом радіації [7, 8]. Оптичні методи реєстрації  $\gamma$ -опромінення є перспективними завдяки високій чутливості, селективності і можливістю використання в різних середовищах. Люмінесцентне випромінювання найбільше чутливе до  $\gamma$ -променів, внаслідок їх високої проникної здатності. Крім того, створення радіаційно-стійких матеріалів є одним із основних завдань радіаційної фізики та хімії твердого тіла для використання в космічних технологіях оптоелектронної техніки.

Для дослідження сцинтиляційних матеріалів, в якості активаторів легуючої домішки, часто слугують рідкісноземельні метали Ce, Nd, Pr, Eu [9, 10, 11].

Крім того, аналізують  $\gamma$ -опромінені кристали і стекла, леговані Ербієм, їх застосовують в якості середовищ в оптоволоконних мережах, оптичних підсилувачах та телекомунікація, тому мотивами дослідження є радіаційна стійкість, та вплив  $\gamma$ -опромінення на втрати оптичного сигналу [12, 13]. Необхідно відзначити, що деякі кристали і стекла, леговані Ербій вивчають, як сцинтилятори радіаційного опромінення [14, 15].

В наших попередніх дослідженнях [16] в системі  $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{In}_2\text{S}_3$  зафіксовані дві потрібні сполуки:  $\text{GaInS}_3$  та  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{1.3}\text{S}_3$ . Сполука  $\text{GaInS}_3$  утворюється по перитектичній реакції  $\text{L} + \text{In}_2\text{S}_3 \leftrightarrow \text{GaInS}_3$  при 1190 К, кристалізується в гексагональній сингонії, пр. гр.  $P6_3$ ,  $a = 0.6655(4)$  нм,  $c = 1.7950(3)$  нм, володіє областю гомогенності, яка при 820 К складає 47-57 мол.%  $\text{In}_2\text{S}_3$ .

Крім того, X-променевою фотоелектронною спектроскопією ми дослідили внутрішні оболонки і валентну зону для вихідного і бомбардованого іонами Аг поверхні монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  [17]. Виявлено, що цей монокристал був радіаційно стійкий по відношенню до Аг-іонного бомбардування. Зокрема, така обробка не викликає яких-небудь істотних змін значень енергій зв'язку електронів із внутрішніх оболонок, а також форми рентгенівських фотоелектронних спектрів (XPS) на рівні внутрішніх оболонок і валентної зони монокристалу. В роботі [17] вважається, що введення Ербію в решітку  $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$  не приводить до значних змін в особливостях хімічного зв'язку вихідного (нелегованого Ербієм) монокристалу.

© Галян<sup>1</sup> В.В., Іващенко<sup>2</sup> І.А., Олексеюк<sup>2</sup> І.Д., Федосов<sup>1</sup> С.А., Третяк<sup>1</sup> А.П., Данилюк<sup>3</sup> І.В., Лебедь<sup>4</sup> О.О., Кевшин<sup>1</sup> А.Г., Тищенко<sup>2</sup> П.В.

Метою цієї роботи є дослідження впливу  $\gamma$ -опромінення на спектри ФЛ в монокристалі  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ .

### Синтез сплавів, методика та техніка експерименту

Ми отримали монокристал  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ , методика та умови отримання якого підбрані з діаграми стану системи  $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{In}_2\text{S}_3$  та термограми охолодження зразка, по якій визначали температуру переохолодження. Використали розчин-розплавний метод, переохолодження розчину-розплаву становило 70 К. Синтез вихідного сплаву при максимальній температурі 1200 К та ріст кристалу проводили в одному вакуумному кварцовому контейнері з дном у вигляді конуса і перетяжкою з діаметром отвору 2 мм. Процес росту проходив у вертикальній двозонній печі. Максимальна температура становила 1200 К, градієнт температури на фронті кристалізації складав 20 К/см. Після розплавлення шихти, ампулу опускали з максимальною швидкістю. Після кристалізації 10 мм розплаву, по довжині ампули, ріст зупиняли, після чого проводили в зворотному напрямі розплавлення 6.0-8.0 мм закристилизованого розплаву і протягом 100 годин здійснювали відпал. Далі проводили вирощування монокристалу при швидкості опускання 5 мм/добу. Після завершення процесу обидві печі охолоджували до 820 К зі швидкістю 50-70 К/добу і відпалювали отриманий монокристал протягом 100 годин. Після цього охолоджували установку в режимі виключеної печі. Отримано монокристал оранжево-жовтого кольору, діаметром 14 мм і довжиною 20 мм. Компонентний склад і структуру вирощеного монокристалу досліджено з допомогою SEM та EDS-аналізу [18].

Дослідження спектрів оптичного поглинання та ФЛ проводилось за стандартною методикою синхродетектування, обладнаною сучасною системою АЦ-перетворювача, монохроматором МДР-206 при кімнатній температурі. Приймання сигналу ФЛ проводилось із тієї ж площини поверхні зразка, що і збудження. Реєстрація сигналу проводилась Si та PbS фотоприймачами. Збудження люмінесценції здійснювалось лазером із максимумом випромінювання 532 нм і потужністю 150 мВт.

Опромінення кристалу проведено джерелом  $^{60}\text{Co}$  на повітрі при температурі навколишнього середовища. Середня енергія падаючих  $\gamma$ -променів була близькою до 1,25 МеВ. Поглинута доза виміряна з використанням пристрою VDEG2-34 SP-1 для виявлення і вимірювання  $\gamma$ -квантів. Діапазон реєстрації  $\gamma$ -променів варіюється в межах значень 0,05 – 3 МеВ. Для дослідження вирізались зразки із центральної частини монокристалу, які опромінювались дозами 420, 1260, 2520, 5040 Гр.

### Результати експерименту та обговорення

Досліджено спектр оптичного поглинання у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  (рис. 1). Як бачимо на графіку зафіксовано вузькі смуги поглинання із максимумами 0,81, 1,27, 1,53, 1,88, 2,34 еВ. Ці максимуми відповідають внутрішньозонним переходам із основного  $^4\text{I}_{15/2}$  в збуджені стани  $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2}$ ,  $^2\text{H}_{11/2}$  іонів  $\text{Er}^{3+}$  відповідно.

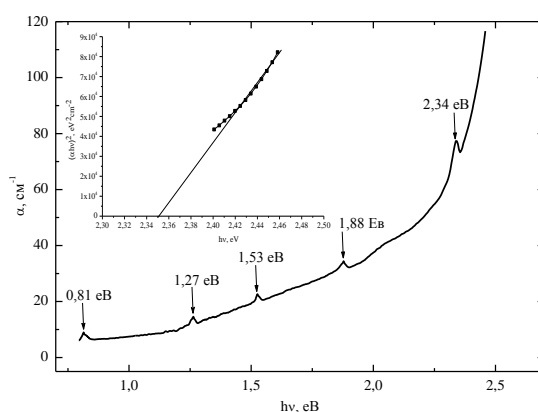


Рис. 1. Спектр оптичного поглинання монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

На вставці рис. 1 побудовано залежність  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  і на основі відомої формули [19] для прямих переходів визначено ширину забороненої зони кристалу:

$$\alpha = A \frac{(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}}{h\nu} \quad (1)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання,  $E_g$  – ширина забороненої зони,  $A$  – константа.

Визначене значення  $E_g = 2,35$  еВ, є дещо меншим, як в роботі І.Р. Амірасланова [20], який отримав монокристали  $\text{GaInS}_3$  методом хімічно-транспортних реакцій. Відмінності пов'язані із різною технологією отримання монокристалів, а також введенням домішки Ербію.

Крім того, ми дослідили спектри ФЛ неопроміненого і опроміненого різними дозами монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  (рис. 2, 3) за кімнатної температури при збудженні лазером із довжиною хвилі 532 нм (2,33 еВ). Як бачимо із рисунків, у видимому і близькому інфрачервоному діапазоні зафіксовано інтенсивні смуги випромінювання із максимумом 1,53 і 0,81 еВ, що відповідає переходам в іонах Ербію  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ ,  ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  відповідно. У всіх зразках розташування та форма спектрів випромінювання зберігається і зростає при опроміненні до 2520 Гр. Зауважимо, що явище збільшення інтенсивності фотолюмінесценції та фоточутливості кристалу  $\text{GaS:Er}^{3+}$  після  $\gamma$ -опромінення спостерігали Р. С. Мадатов, Т. Б. Тагієв та ін. [21]. При подальшому збільшенні дози опромінення до 5040 Гр інтенсивність максимуму при 1,53 еВ не зазнає видимих змін, а при 0,81 еВ незначно зменшується.

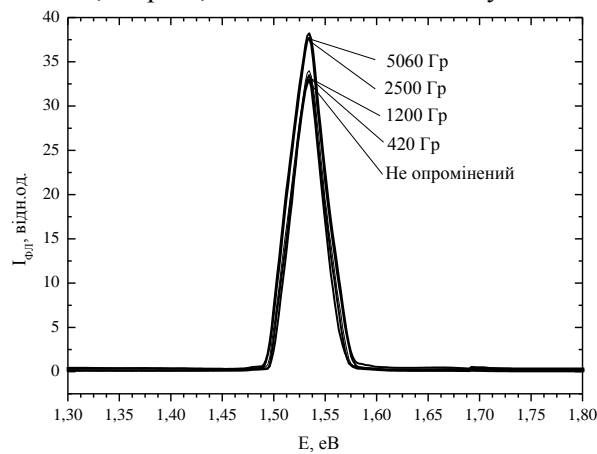


Рис. 2. Видимий діапазон спектрів ФЛ неопроміненого і опроміненого при різних дозах монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

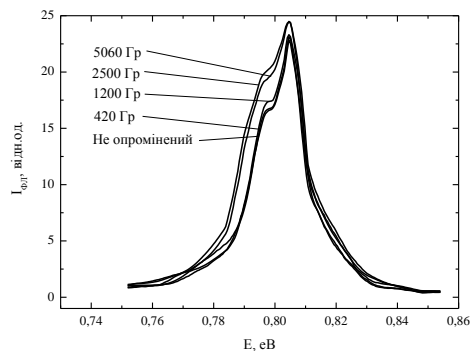


Рис. 3. Інфрачервоний діапазон спектрів ФЛ неопроміненого і опроміненого при різних дозах монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

Для того щоб зрозуміти механізм випромінювання ми звернулись до діаграми енергетичних переходів в іонах Ербію (рис. 4). Збудження із довжиною хвилі 532 нм (2,33 еВ) переводить іони Ербію із основного в збуджений стан  ${}^2\text{H}_{11/2}$ . Існування інтенсивних смуг ФЛ із максимумами 1,53 і 0,81 еВ забезпечується високою концентрацією іонів Ербію в збуджених станах  ${}^4\text{I}_{9/2}$  і  ${}^4\text{I}_{13/2}$ . Перейти в ці стани іони Ербію можуть двома шляхами: 1) з допомогою кросрелаксації CR1; 2) безвипромінювальною релаксацією із стану  ${}^2\text{H}_{11/2}$  до станів  ${}^4\text{I}_{9/2}$  і  ${}^4\text{I}_{13/2}$ , через які відбувається ФЛ випромінювання. Безвипромінювально релаксувати у стан  ${}^4\text{I}_{9/2}$ , іони Ербію не можуть, внаслідок великої енергетичної відстані між станами  ${}^4\text{S}_{3/2} - {}^4\text{F}_{9/2}$  та  ${}^4\text{F}_{9/2} - {}^4\text{I}_{9/2}$ .

За даними роботи [22] енергетична відстань між станами  ${}^4S_{3/2}$  –  ${}^4F_{9/2}$  становить  $3071\text{ см}^{-1}$  ( $0,38\text{ еВ}$ ), а енергія фононів кристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ , згідно із даними раманівської спектроскопії [18] –  $250\text{ см}^{-1}$  ( $0,031\text{ еВ}$ ). Тому ми вважаємо, що реалізація збуджених станів  ${}^4I_{9/2}$  та  ${}^4I_{13/2}$  відбувається за участю кросрелаксаційного процесу CR1 (рис. 4).

Кросрелаксація проходить між сусідніми іонами Ербію, які знаходяться в стані  ${}^2H_{11/2}$  і  ${}^4I_{15/2}$ , внаслідок чого перший іон Ербію переходить в стан  ${}^4I_{9/2}$ , а другий

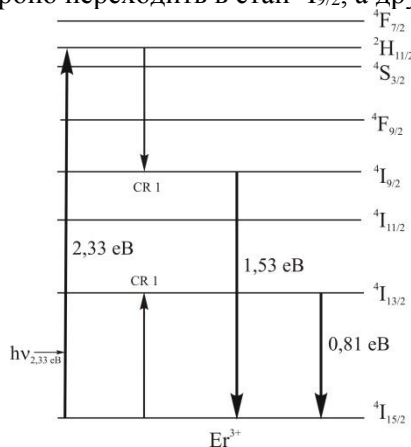


Рис. 4. Діаграма енергетичних рівнів в іонах Ербію

в стан  ${}^4I_{13/2}$  згідно із формулою:



Як бачимо із діаграми (рис. 4), при такому механізмі велика кількість іонів Ербію переходить в збуджені стани  ${}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4I_{13/2}$  через які відбувається люмінесцентне випромінювання. Крім того, при високих дозах опромінення ( $2500, 5060\text{ Гр}$ ) генерується значна концентрація  $\gamma$ -індукованих дефектів, які впливають на інтенсивність люмінесценції.

На відміну від дослідженого в цій статті монокристалу, в сульфідних склоподібних сплавах [5, 6] спостерігається велика кількість смуг випромінювання, але з меншою інтенсивністю. Це пов'язано з тим, що іони Ербію в стеклах можуть займати декілька позицій і з кожної можемо фіксувати ФЛ випромінювання. Також в стеклах під впливом  $\gamma$ -опромінення [23] змінюється механізм люмінесцентного випромінювання. В монокристалі  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  значних змін у спектрах люмінесценції під впливом  $\gamma$ -опромінення не зафіксовано, що визначає його перевагу в радіаційній стійкості для можливого застосування в оптоелектронній техніці.

### Висновки

Досліджено спектри оптичного поглинання монокристалу  $\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  і визначено ширину забороненої зони, яка становить  $2,35\text{ еВ}$ . Зафіксовану ФЛ в інтервалі  $1,48 - 1,61$  і  $0,75 - 0,86\text{ еВ}$  пов'язуємо з внутрішніми переходами в іонах Ербію. Після опромінення зразків розташування та форма максимумів ФЛ не змінилась, що свідчить про радіаційну стійкість монокристалу  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ . Вважаємо, що збільшення інтенсивності ФЛ при великих дозах опромінення пов'язано із виникненням значної кількості  $\gamma$ -індукованих дефектів.

### Інформаційні джерела

1. Band structure, electronic and optical features of  $\text{Tl}_4\text{SnX}_3$  ( $X = \text{S}, \text{Te}$ ) ternary compounds for optoelectronic applications / M. Piasecki, M.G. Brik, I.E. Barchiy, K. Ozga, I.V. Kityk, A.M. El-Naggar, A.A. Albassam, T.A. Malakhovskaya, G. Lakshminarayana. // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 710. – P. 600–607.
2. Concentration dependence of the optical properties of glassy alloys in the  $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$  system / A.H. Kevshyn, V.V. Halyan, H.Ye. Davydyuk, O.V. Parasyuk, I.I. Mazurets // Glass Physics and Chemistry. – 2010. – Vol. 36. – P. 27–32.
3. Huge operation by energy gap of novel narrow band gap  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$  ( $B = \text{Si}, \text{Ge}$ ): DFT, x-ray emission and photoconductivity studies / M. Piasecki, G.L. Myronchuk, O.V. Zamurueva, O.Y. Khyzhun, O.V. Parasyuk, A.O. Fedorchuk, A. Albassam, A.M. El-Naggar, I.V. Kityk // Materials Research Express. – 2016. – Vol. 3. – P. 025902.

4. Phase equilibria in the quasi-ternary system  $\text{Ag}_2\text{Se}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{Se}_3$  and physical properties of  $(\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4})_2\text{Se}_3$ ,  $(\text{Ga}_{0.594}\text{In}_{0.396}\text{Er}_{0.01})_2\text{Se}_3$  single crystals / I.A. Ivashchenko, I.V. Danyliuk, I.D. Olekseyuk, V.V. Halyan // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2014. – Vol. 210. – P. 102–110.
5. Role of structural ordering on optical properties of the glasses  $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$  / V.V. Halyan, V.V. Strelchuk, V.O. Yukhymchuk, A.H. Kevshyn, G.Ye. Davydyuk, M.V. Shevchuk, S.V. Voronyu // *Physica B*. — 2013. – Vol. 411. – P. 35–39.
6. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of  $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$  glasses / V.V. Halyan, I.V. Kityk, A.H. Kevshyn, I.A. Ivashchenko, G. Lakshminarayana, M.V. Shevchuk, A. Fedorchuk, M. Piasecki // *Journal of Luminescence*. – 2017. – 181. – P. 315–320.
7. Raman and photoluminescence characterization of diamond films for radiation detectors / Iu. Nasieka, V. Strelchuk, M. Boyko, V. Voevodin, A. Vierovkin, A. Rybka, V. Kutniy, S. Dudnik, V. Gritsina, O. Opalev, V. Strel'nitskij // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2015. – Vol. 223. – P. 18–23.
8. Influence of electron beam irradiation on nonlinear optical properties of Al doped ZnO thin films for optoelectronic device applications in the cw laser regime / Albin Antony, S. Pramodini, P. Poornesh, I.V. Kityk, A.O. Fedorchuk, Ganesh Sanjeev // *Optical Materials*. – 2016. – Vol. 62. – P. 64–71.
9. P.A. Rodnyi. Progress in fast scintillators // *Radiation Measurements*. – 2001. – Vol. 33, No 5. – P. 605–614.
10. Study of VUV emission and  $\gamma$ -ray responses of Nd:BaF<sub>2</sub> scintillaotor / Takayuki Yanagida, Noriaki Kawaguchi, Yuui Yokota, Sumito Ishidu, Kei Kamada. // *Radiation Measurements*. – 2010. – Vol. 45, No 3–6. – P. 422–425.
11. Takayuki Yanagida. Ionizing radiation induced emission: Scintillation and storage-type luminescence // *Journal of Luminescence*. – 2016. – Vol. 169, Part B. – P. 544–548.
12. Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibers / B. Tortech, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J.-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2007. – Vol. 353, No 5–7. – P. 477–480.
13. Enhanced radiation resistance of near-infrared photoluminescence emission induced by Er/Si nanoclustering / C. Wang, D. Barba, S. Slim, Y.Q. Wang, F. Rosei // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 126. – P. 57–63.
14. Scintillation properties of Er-doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  single crystals / Akihiro Yamaji, Hiraku Ogino, Yutaka Fujimoto, Akira Suzuki, Akira Yoshikawa // *Radiation Measurements*. – 2013. – Vol. 56. – P. 116–119.
15. Crystal growth and scintillation properties of Er-doped  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  single crystals / Makoto Sugiyama, Yutaka Fujimoto, Takayuki Yanagida, Daisuke Totsuka, Shunsuke Kurosawa, Yoshisuke Futami, Yuui Yokota, Valery Chani, Akira Yoshikawa // *Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2012. – Vol. 664. – P. 127–131.
16. Phase equilibria in the quasiternary system  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{Se}_3$  and optical properties of  $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$ ,  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  single crystals / I.A. Ivashchenko, I.V. Danyliuk, I.D. Olekseyuk, V.Z. Pankevych, V.V. Halyan // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2015. – Vol. 227. – P.255–264.
17. Electronic structure of  $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$  and  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  single crystals / O.Y. Khyzhun, V.V. Halyan, I.V. Danyliuk, I.A. Ivashchenko // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2016. – Vol. 27. – P. 3258 – 3264.
18. Laser stimulated piezo-optics of  $\gamma$ -irradiated  $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$  and  $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$  single crystals / I.V. Kityk, V.O. Yukhymchuk, A. Fedorchuk, V.V. Halyan, I.A. Ivashchenko, I.D. Oleksieyuk, M.A. Skoryk, G. Lakshminarayana, A.M. El-Naggar, A.A. Albassam, O.O. Lebed, M. Piasecki // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 722. – P. 265-271.
19. Ж. Панков. Оптические процессы в полупроводниках. – Москва: Мир, 1973. – 456 с.
20. Выращивание монокристаллов, структура и фотоэлектрические свойства новых полиморфных модификаций  $\text{GaInS}_3$  / И.Р. Амирасланов, Т.Х. Азизов, Г.Г. Гусейнов, А.С. Кулиев, Г.М. Нифтиев // *Неорг. Матер.* – 1988. – Vol. 24, №5. – 723–726.



21. Optical and photoelectric properties of gamma-irradiated GaS:Er<sup>3+</sup> layered crystals / A. R. S. Madatov, T. B. Tagiev, S.A. Abushev, Sh.P. Shekili, A.R. Mobili // *Inorganic Materials*. – 2008. – Vol. 44, No 4. – 333–336.
22. Er<sup>3+</sup> to glass matrix energy transfer in Ga–Ge–S:Er<sup>3+</sup> system / T.Yu. Ivanova, A.A. Man'shina, A.V. Kurochkin, Yu.S. Tver'yanovich, V.B. Smirnov // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2002. – Vol. 298. – P. 7-14.
23. EPR of  $\gamma$ -induced defects and their effects on the photoluminescence in the glasses of the Ag<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.05</sub>Ge<sub>0.95</sub>S<sub>2</sub>–Er<sub>2</sub>S<sub>3</sub> system / V.V. Halyan, A.A. Konchits, B.D. Shanina, S.V. Krasnovyd, O.O. Lebed, A.H. Kevshyn, M.V. Shevchuk, A.V. Bodnaruk, V.O. Yukhymchuk // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2015. – Vol. 115. – P. 189–195.

**Галян В.В., Иващенко И.А., Олексеюк И.Д., Федосов С.А., Третьак А.П., Данилюк І.В., Лебедь О.О., Кевшин А.Г., Тищенко П.В.**

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки, Луцк  
Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно

### МЕХАНИЗМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛА (Ga<sub>54.59</sub>In<sub>44.66</sub>Er<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>S<sub>300</sub>

Монокристалл (Ga<sub>54.59</sub>In<sub>44.66</sub>Er<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>S<sub>300</sub> выращенный методом раствора-расплава и облученный  $\gamma$ -лучами дозой 420, 1260, 2520, 5040 Гр с помощью источника <sup>60</sup>Co. Зафиксировано интенсивное люминесцентное излучение в интервалах 1,48 – 1,61 и 0,75 – 0,86 эВ при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм. Построена диаграмма энергетических уровней для ионов эрбия и установлен механизм излучения, в котором важную роль играет процесс кроссрелаксации. При высоких дозах облучения (2520, 5040 Гр) происходит увеличение интенсивности люминесцентного излучения, которое связывается с ростом концентрации  $\gamma$ -индуцированных дефектов кристалла.

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, кроссрелаксация, спектр поглощения.

**Halyan V.V., Ivashchenko I.A., Olekseuk I.D., Fedosov S.A., Tretyak A.P., Danyliuk I.V., Lebed O.O., Kevshyn A.H., Tishchenko P.V.**

Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk  
National University for Water Economy and Nature Management, Rivne

### MECHANISM OF PHOTOLUMINESCENCE IN (Ga<sub>54.59</sub>In<sub>44.66</sub>Er<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>S<sub>300</sub> SINGLE CRYSTAL

Using solution-melt method (Ga<sub>54.59</sub>In<sub>44.66</sub>Er<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>S<sub>300</sub> single crystal was grown. The single crystal specimens were irradiated of the  $\gamma$ -radiation with the doses of 420, 1260, 2520, 5040 Gr with the help of a <sup>60</sup>Co source. An intense luminescent radiation was recorded in the range of 1.48 - 1.61 and 0.75 - 0.86 eV under laser excitation with 532 nm wavelength. A diagram of energy levels for erbium ion was constructed and the mechanism of radiation was established, in which the cross-relaxation process plays an important role. At high doses of irradiation (2520, 5040 Gr) the intensity of the luminescent radiation increases, that we associate with increase in the concentration of  $\gamma$ -induced defects in the crystal.

**Keywords:** photoluminescence, cross-relaxation, absorption spectrum.

УДК 657.471

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-9>

Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

Луцький національний технічний університет

## ТЕХНІЧНА ПІДГОТОВКА АВТОМАТИЧНОГО СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ

*Правильна технічна підготовка (ТП) значно скорочує час і витрати складального виробництва шляхом аналізу та синтезу структури необхідних робіт з метою їх мінімізації. При цьому вимагається застосування інноваційного підходу комп'ютерно-інтегрованого виробництва СІМ. Завданням є одержання зоптимізованого календарного плану ТП, побудованого з використанням спеціальних алгоритмів і програм, наприклад типу Форда. Для правильного вирішення задачі краще застосовувати автоматизовані системи ТП. Критерієм вибирається показник підготовленості виробу до автоматичного складання, одержаного за інтегрованою методикою такої оцінки.*

**Ключові слова:** складання, підготовка, алгоритм, програма, оцінка.

### Вступ.

ТП складального виробництва являється першою та фундаментальною частиною виробничого процесу, від якого залежать техніко-економічні показники виготовлення приладів. Час ТП характеризує календарний період часу, протягом якого виконуються всі необхідні роботи, пов'язані з підготовкою автоматичного чи автоматизованого складання. Для забезпечення випуску приладів необхідно встановити необхідну інформацію, потрібні складальні процеси, а також враховувати додаткові процеси, бажані виходи, їх етапи, види діяльності, потоки, контрольні вимірювання, потреби в підготовці складального обладнання, методи, матеріали і інші ресурси [1].

### Викладення основного матеріалу.

ТП розділяється на *конструкторську, технологічну, організаційну* і складається з ряду етапів, підетапів робіт. Конструкторська підготовка (КП) включає розробку: технічного завдання на проектування приладу та технічної пропозиції, ескізного, технічного та робочого проєктів, виготовлення та випробування дослідних зразків, запуск в серійне виробництво. Об'єктами КП є як складальні прилади, так і автоматичне складальне обладнання з оснащенням, а загалом, конструкція складального об'єкту.

Технологічна підготовка (ТехП) включає: забезпечення технологічності конструкції складального приладу та автоматичного складального обладнання з оснащенням, проектування технологічних процесів автоматичного складання приладів і засобів оснащення складального виробництва.

Організаційна підготовка передбачає: вибір типу виробництва, складальної структури і проектування складальних процесів, організація складальних процесів в часі, проектування системи технічного обслуговування, форм організації та оплати праці.

Зразкова структура технічної підготовки виробництва нового приладу приведена на рис. 1. На структуру впливають: різновид приладу, рівень його сучасності, складність, програма випуску, тип і організаційна форма складання, точність складання та інші показники якості, кваліфікація обслуговуючого персоналу, у тому числі складальників, технічний рівень фірми, цикл технічної підготовки, що закладається, фінансове забезпечення і багато що інше.

Конструкція складального з'єднання повинна:

- максимально відповідати особливостям автоматичного складання;
- забезпечувати складання деталей простими досягненнями при мінімальному числі напрямків складання;
- складатися з максимально можливого числа стандартних і уніфікованих деталей;
- забезпечувати точність методом повної взаємозамінності та виключати необхідність виконання пригонювальних і складально-розбірних робіт;



Рис. 1. Схема структури та роботи при ТП виробництва

обґрунтована й забезпечує можливість виконання ефективного відпрацювання технологічності з метою досягнення її оптимального рівня. Методика такого відпрацювання виходить з схеми послідовності визначення комплексного показника технологічності конструкції приладу і полягає в розрахунку складових і комплексного показника технологічності конструкції.

Все різноманіття показників технологічності конструкції розбивається на наступні групи:

- технологічної раціональності конструкції приладу (коефіцієнти складності конструкції, складованості, легкості складових частин, доступності місць обслуговування і т.п.);
- спадкоємності конструкції приладу (коефіцієнти новизни конструкції, вживаності уніфікованих або стандартних складових частин, повторюваності складових частин, типізації конструкційного виконання і т.д.);
- виробничої технологічності (показники трудомісткості виробу в технічній підготовці виробництва, у виготовленні, тривалості технічної підготовки виробництва приладу, тривалості його виготовлення, технологічної собівартості приладу в ТехП виробництва, у виготовленні і т.п.);
- експлуатаційної технологічності (показники трудомісткості приладу в експлуатації, в технічному обслуговуванні, матеріаломісткості приладу в експлуатації, технологічній собівартості в експлуатації і т.д.);
- ремонтної технологічності (показники трудомісткості приладу в ремонті, матеріаломісткості приладу в ремонті, технологічній собівартості в ремонті і т.д.);
- загальної технологічності (показники питомої трудомісткості приладу, матеріаломісткості, технологічної собівартості і т.д.).

© Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

- складатися з мінімального числа деталей із забезпеченням їх мінімальності за рахунок ускладнення конструкції;

- мати базову деталь і можливість поєднання її конструкторських, технологічних і вимірювальних баз;

- мати яскраво виражені базові поверхні, що фіксують елементи, а також відповідні направляючі елементи для полегшення автоматичної складальності;

- використовувати нові ефективні методи з'єднання в порівнянні з традиційними;

- забезпечувати зручність контролю параметрів складання із застосуванням найпростіших, ефективніших способів і засобів автоматичного контролю.

Оцінка технологічності конструкції автоматично складаних приладів може бути якісною або кількісною. Кількісна оцінка конкретніша,

В процесі розробки приладів і відпрацювання на технологічність конструкції виконується порівняння за базовими показниками, які застосовуються в якості вихідних. Склад базових показників і їх оптимальні значення звичайно встановлюються стандартами або беруться по визнаному перспективному зразку [2].

Методика оцінки підготовленості конструкції приладу до автоматичного складання полягає в наступному:

- Визначаються часткові показники технологічності конструкції складаної деталі за підготовленістю до автоматичного просторового орієнтування, переміщення на складальну позицію, базування на складальній позиції, взаємного орієнтування, спряження та закріплення. Вибір часткових показників проводиться за таблицями, а також можливо і експертним методом.

- Визначаються часткові показники технологічності конструкції складаної деталі, що враховують конструкційні особливості приладу. Це показники технологічності конструкції з'єднання, числа напрямків складання, що входять в нього деталей і вузлів, складності автоматичного контролю. Вони також визначаються подібно вищезгаданім, але враховується ще частковий коефіцієнт вагомості.

По окремих видам розраховуються комплексні показники технологічності:

$$K_j^k = \frac{\sum_1^x K_i \alpha_i}{\sum_1^x \alpha_i}, \quad (1)$$

де  $\alpha_i$  - коефіцієнти вагомості;  $K_i$  - складові коефіцієнти або показники;  $x$  - число складових коефіцієнтів. Найменування складових показників вказані в таблицях. Визначається два таких комплексних показника технологічності: конструкції складаних деталей та приладу в цілому.

Розраховується значення комплексного показника технологічності конструкції приладу. При цьому максимальне значення показника рівне одиниці, а мінімальне - нулю. Якщо одержане значення більше 0,85, то можна вважати, що прилад повністю підготовлений до автоматичного складання, яке може бути здійснена без зміни конструкції складаного приладу. При розрахунковому значенні цього коефіцієнта, що знаходиться в межах 0,35 - 0,85 прилад не готовий до автоматичного складання і вимагається виконати деякі зміни його конструкції або використати іншу технологію складання. При значенні цього коефіцієнта менше 0,5, можна вважати, що конструкція приладу непридатна для автоматичного складання, а її проведення практично недоцільне. В цьому випадку потрібна корінна переробка конструкції приладу і зміна технології складання [3].

До недоліків ТП в приладобудуванні можна віднести негативний вплив внутрішніх і зовнішніх чинників, основними з яких можна вважати наступні. Бізнес-чинник: необгрунтоване скорочення необхідних підготовчих робіт, а особливо витрат, що приводить до зниження якості приладів і їх конкурентоспроможності. Перетворення приватизації в «прихватизацію», занепад економіки країни, значний політичний вплив замість економічного. Всі хочуть заробляти гроші прямо з повітря. До внутрішніх чинників в першу чергу можна віднести відсутність кваліфікованих розробників, матеріально-технічну незабезпеченість виробництва, замкнутий цикл ТП, неповне використання комплексних стандартів, відсутність між виробничих зв'язків, дубляж питань тощо.

#### **Висновки.**

Більшість приладів приладобудування орієнтована на ручне складання і тому зовсім непридатне для автоматичного. Це вимагає переконструювання як старих конструкцій, так і проектування нових. При цьому доцільно використовувати автоматизовані системи ТП і їх програми автоматизованого складання, як наприклад програму Forda. Побудова календарного плану робіт складається з наступних етапів: конструкторського, технологічного та організаційного. Основною вимогою етапів є одержання плану виконуваних робіт максимально коротким за часом і особливо затрачуваними витратами, що забезпечується комплексною їх оптимізацією.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Божидарнік В.В., Григор'єва Н.С., Шабайкович В.А. Автоматичне складання виробів: - Луцьк. «Надстир'я». 2005. -386 с.

2. Машинобудування: Енциклопедія. Технологія складання в машинобудуванні. Т III-5. / Під заг.ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машинобудування, 2001. -640 с. іл.
3. Григор'єва Н.С. Науково-технологічні основи гнучкого модульного автоматичного складання виробів. – Луцьк. «Надстир'я». 2008. -520 с.

**Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.**  
Луцкий национальный технический университет

### **ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ ПРИБОРОВ**

*Правильная техническая подготовка (ТП) значительно сокращает время и затраты сборочного производства путем анализа и синтеза структуры необходимых работ с целью их минимизации. При этом требуется применение инновационного подхода компьютерно-интегрированного производства СИМ. Задачей является получение оптимизованного календарного плана ТП, построенного с использованием специальных алгоритмов и программ, например, Форда. Для правильного решения задачи лучше применять автоматизированные системы ТП. Критерием выбирается показатель подготовленности изделия до автоматизированной сборки, полученной по интегрированной методике такой оценки.*

**Ключевые слова:** *сборка, подготовка, алгоритм, программа, оценка.*

**N. Grigorieva, DSc, PhD prof., V. Shabaykovich, DSc, PhD Prof.**  
Lutsk National Technical University

### **TECHNICAL PREPARATION AUTOMATIC ASSEMBLY OF DEVICES**

Proper technical training (TT) significantly reduces the time and cost of assembly production by analyzing and synthesizing the structure of the necessary works in order to minimize it. This requires the use of an innovative approach to computer-integrated production (CIM). The task is to obtain an optimized calendar plan for TT, built using special algorithms and programs, for example of Ford. For the correct solution of the problem, it is better to use automated TT systems. The criterion is the indicator of the product readiness to the automated assembly, obtained by the integrated method of such an assessment.

**Keywords:** *assembly, preparation, algorithm, program, evaluation.*

УДК 531.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-10>

Діхтієвський О.В., Квасніков В.П., д.т.н., Возняковський А.О., к.т.н.

Національний авіаційний університет

### ОЦІНКА СИСТЕМАТИЧНОЇ ТА ВИПАДКОВОЇ СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

*Для контролю всієї сукупності параметрів зубчастих коліс потрібне використання відразу цілої гами засобів вимірювальної техніки та комплексів. Багато з них морально застаріли, не автоматизовані, не мають виходу на комп'ютерні засоби і не забезпечують сучасного рівня точності, інформативності та швидкодії. На сьогоднішній день метрологічний контроль параметрів зубчастих коліс базується на великій кількості вимірювального обладнання. Всі вони мають обмежений діапазон вимірювальних параметрів, різну точність і діапазон вимірюваних значень. Розглянуто комплекс робіт по створенню системи забезпечення єдності геометричних параметрів зубчастих передач. Це вимагає перегляду, систематизації та розробки методів та засобів метрологічного забезпечення. Розглянуто еталонну базу в області контролю евольвенти зубчастого колеса, яка вимагає її створення на основі детального аналізу нових принципів вимірювання, необхідності обґрунтування їх точності, розширення діапазону та діапазону вимірюваних параметрів. Тому в статті запропонована оцінка систематичної та випадкової складових похибки вимірювання циліндричних зубчастих коліс. Проведений аналіз похибок для реальних умов експлуатації на етапі попередніх досліджень, коли не відомий перелік складових основної похибки і не проведена їх кількісна оцінка.*

**Ключові слова:** шестерня, похибка, вимірювальний комплекс, швидкодія, діагностичний канал.

Для існуючих традиційних пристроїв [1] для вимірювань параметрів шестерні використовують як еталон реальний матеріальний об'єкт - виготовлену поверхню евольвенти [2], що має, хоча і невеликі, але реальні похибки - відхилення від теоретичної евольвенти. Як еталон використовується ідеальне уявлення у вигляді математичної моделі [3] з яким і порівнюється вимірюваний профіль шестерні.

Наявність сучасного комп'ютерного забезпечення [4] дозволяє здійснити автоматичну обробку результатів вимірювань, підвищити інформативність результатів за рахунок можливості графічного виведення інформації, значно підвищити точність результатів вимірювань за рахунок математичної компенсації похибок систематичних складових, а також зменшити випадкові похибки за рахунок статистичної обробки [5].

Все це створює передумови для розробки і впровадження на базі координатно-вимірювальних машин [6] сучасних прецизійних координатних методів і засобів вимірювань геометричних параметрів шестерні, а також їх метрологічного забезпечення.

В даний час ведеться виробництво нових модифікацій вітчизняних засобів вимірювань [7], систематично ввозяться з-за кордону, засновані на нових принципах, контрольно-вимірювальні прилади провідних зарубіжних виробників в області евольвентометрії, таких, як фірми Hofler, Klingelberg, CarlZeiss, Mahr, Hommelverke.

Якість машин у великій мірі залежить від роботи зубчастих механізмів, які є найбільш поширені серед механічних передач завдяки своїм техніко-економічним показникам. Якість зубчастого колеса багато в чому визначається точністю цілого ряду параметрів, що залежать від технічного стану зубообробного обладнання, рівня технології, якості ріжучого інструменту і якості контрольно-вимірювальних операцій зубообробного виробництва.

Зубчасті колеса є найбільш масовими деталями, що застосовуються в машинобудуванні та приладобудуванні. Сьогодні в розпорядженні промисловість величезну кількість складних дорогих зубовимірювальних приладів, якими оснащені практично всі підприємства, що виробляють і контролюють зубчасті колеса. На сьогодні в Україні на промислових підприємствах експлуатується більше десятка тисяч засобів вимірювальної техніки всієї номенклатури геометричних параметрів.

Широке використання зубчастих коліс в багатьох галузях машинобудування та приладобудування ставить завдання розвитку метрологічного забезпечення їх виробництва. Це

обумовлено вимогами підвищення точності, якості і конкурентоспроможності виробів, де вони використовуються.

Середнє арифметичне і вибіркова дисперсія можуть використовуватися в якості оцінок похибок вимірювання і при законах розподілу, що відрізняються від нормального. Однак зазвичай не вдається визначити закони розподілу цих одиничних оцінок і знайти їх довірчі інтервали. Щодо середнього арифметичного, то можна стверджувати, що вже при відносно невеликих  $n$  (20—30) воно розподілено близько до нормального. Це дозволяє з достатньою для практики точністю використовувати квантілі нормального розподілу при оцінці інтервалу для середнього арифметичного. Аналогічно можна стверджувати, що при великій кількості вимірів ( $n > 100$ ) для одномодальних аппроксимацій щільності розподілів можна використовувати нормальний розподіл при грубій оцінці інтервалу, який накриває істинне значення дисперсії випадкової похибки. Разом з тим для ряду розподілів зручно використовувати інші вибіркові характеристики.

Так, в разі рівномірного розподілу достатніми статистиками щодо математичного очікування і дисперсії є крайні члени варіаційного ряду. Для цього розподілу в якості оцінки математичного очікування необхідно брати центр  $M$  розмаху, а замість вибіркового середнього квадратичного відхилення зручніше використовувати оцінку ширини розподілу  $l$ :

$$l = \frac{n+1}{2(n-1)}(x_n - x_1). \quad (1)$$

Дисперсія оцінок центру розмаху і його ширини:

$$D_M = \frac{4l^2}{2(n+1)(n+2)}, \quad (2)$$

$$D_l = \frac{8l^2}{(n+1)(n+2)}. \quad (3)$$

Якщо оцінювати не середину розподілу і його ширину, а положення початкової  $a$  і кінцевої  $b$  точок розподілу, то оцінки і їх дисперсії відповідно:

$$a = x_1 - \frac{1}{n-1}(x_n - x_1), \quad (4)$$

$$b = x_n + \frac{1}{n-1}(x_n - x_1), \quad (5)$$

$$D(a) = D(b) = \frac{4n}{(n^2-1)(n+2)}l^2. \quad (6)$$

Центр розмаху доцільно використовувати при визначенні систематичної складової похибки вимірювання також в разі арксінусоїдального та інших розподілів. Для двухмодальних розподілів пропонується використовувати більш складну в обчислювальному відношенні оцінку. Для симетричних розподілів з позитивним ексцесом (Лапласа, узагальнене експоненціальне) ефективною оцінкою математичного очікування (при великих  $n$ ) є медіана.

Для оцінки середнього квадратичного відхилення або дисперсії при невеликому  $n$  зазвичай використовують статистики, засновані на розмахах, середньому розмаху, квазірозмахах і функціях від розмахів.

Таким чином, проблема визначення систематичної і оцінки випадкової складових похибок вимірювання може бути вирішена, якщо відомий вид закону розподілу і число дослідів  $n$ . Але в реальних ситуаціях припущення про те, що нам відомий вид закону розподілу, є невиправданим. Це пояснюється як суттєвою залежністю статистичних властивостей похибки вимірювань від умов досліду, так і наявністю похибок вимірювання.

У зв'язку з цим велику цінність (особливо при автоматизованій обробці результатів вимірювань, коли людина не може оперативного втрутитися в процес обробки) мають оцінки робасні (стійкі) до виду розподілу тобто досить ефективні для широкого класу реальних розподілів. Природно, що подібні оцінки можуть бути менш ефективні, ніж оцінки, оптимальні для конкретного розподілу, Прикладом оцінки, стійкої до грубих похибок і виду симетричного розподілу з позитивним ексцесом, є медіана. Робастною оцінкою середнього квадратичного відхилення є медіана абсолютних відхилень. У той же час середнє арифметичне і дисперсія чутливі

до грубих похибок. Правда, цензурування вибірки, використання квазірозмахів (підрозмахів) дозволяють збільшити стійкість оцінок до грубих похибок.

Загальним принципом конструювання робостних оцінок є збільшення ваги тих елементів варіаційного ряду, які відомі та з найбільшою вірогідністю і в найбільшій мірі визначають оцінюваний параметр. А це означає, що для побудови хороших робостних оцінок все ж потрібна певна інформація про розподіл похибок вимірювань. Так, можна при оцінюванні математичного очікування симетричного розподілу з найбільшою вагою підсумовувати елементи, віддалені від математичного очікування на  $1/4$  розмаху. У статистичній літературі наведені різні функції, що визначають ваги спостережень, оптимальні при відомому вигляді розподілу. Якщо інформація про розподіл оцінюваного параметра обмежена, то доцільно використовувати адаптивні процедури, наприклад, бівес-оцінку:

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{c_j}{\sum_{i=1}^n c_i} x_j. \quad (7)$$

де  $c_j$  – вагові коефіцієнти.

$$c_j = \begin{cases} (1 - u_j^2)^2 & \text{при } u_j^2 < 1; \\ 0 & \text{при } u_j^2 \geq 1, \end{cases}$$

де  $u_j = \frac{x_j - x}{kS}$  – нормалізоване відхилення  $x_j$  від оцінки математичного очікування  $x$ ;  $S$  – робостна оцінка середнього квадратичного відхилення. Зазвичай беруть медіану абсолютних відхилень або половину міжквартильного розмаху;  $k$  – коефіцієнт, що дорівнює 6 або 9. З огляду на, що ваги в (7) вибираються як подвійне квадратичне зважування, тоді така оцінка називається «бівес» (біквдратна вага). Ця оцінка привласнює великі ваги результати вимірювань, близьким до оцінки  $x$ . По мірі зростання нормованого відхилення  $u_j$  ваги зменшуються, а всі результати, що відхиляються від оцінки більше ніж на  $kS$ , просто відкидаються. Бівес визначається шляхом ітерацій, так як  $x$  залежить від ваги  $c_j$ , а ваги – від  $u_j$  яке, в свою чергу, визначається через  $x$ .

Інтервальна оцінка бівеса

$$\left( \frac{t_{1-P_d} S_x}{2} < x < \frac{t_{1+P_d} S_x}{2} \right) = P_d, \quad (8)$$

де  $S_x$  – оцінка середнього квадратичного відхилення бівеса, а квантиль розподілу Стьюдента береться для числа ступенів свободи  $\nu = 0,7(n - 1)$ . Дисперсія бівеса визначається

$$S_x^2 = \frac{n \sum_{j=1}^n c_j^2 (x_j - x)^2}{(\sum_{j=1}^n (5c_j - 4\sqrt{c_j})) (\sum_{j=1}^n (5c_j - 4\sqrt{c_j}) - 1)}. \quad (9)$$

При невеликих  $n$  і невідомому розподілу похибок вимірювання для визначення границь довірчого інтервалу можна використовувати бутстреп-метод. Цей метод полягає у формуванні штучних вибірок, елементи яких вибираються випадковим чином з наявних експериментальних даних. Отримані таким чином вибірки застосовують потім для обчислення меж довірчого інтервалу. Існують і інші методи максимального використання всієї інформації, що міститься в малій вибірці.

При «ручній» обробці даних вимірювань зазвичай використовують для оцінки результату вимірювання медіани. Як зазначалося раніше, медіана-це вибіркова оцінка квантиль, якої відповідає рівню  $P = 0,5$ . Будь-який елемент варіаційного ряду  $x_j$  є вибірковою для ймовірності  $P_j = j/n$ .

Як відомо, ймовірність появи в  $n$  незалежних випробуваннях рівно  $i$  якихось «виділених» подій визначається формулою біноміального розподілу

$$B(s, n, P) = C_n^i P^i (1 - P)^{n-i}, \quad (10)$$

де  $P$  – ймовірність появи «виділеної» події в одному спостереженні;  $C_n^i$  – число поєднань з  $n$  по  $i$ . Ймовірність того, що в  $n$  досвідах з'явиться не менше  $m$  виділених подій:



$$P(\mu \leq m, n, P) = \sum_{i=1}^m C_n^i P^i (1-P)^{n-i}. \quad (11)$$

Вираз (11) затабуліровано для різних  $P, n, m$ . Імовірність події, що  $l$ -й або  $h$ -й елементи варіаційного ряду будуть не більше або не менш квантилі рівня  $P$  визначається (11) при  $m = l$  або  $m = h$  відповідно. А ймовірність попадання квантилі рівня  $P$  в інтервал, обмежений що  $l - m$  та  $h - m$  елементами варіаційного ряду, дорівнює

$$P(x_l \leq x_p \leq x_h) = \sum_{i=1}^m C_n^i P^i (1-P)^{n-i}. \quad (12)$$

Таким способом можна знайти довірчі інтервали для оцінок математичного очікування та середнього квадратичного відхилення, заснованих на порядкових статистиках: центрі розмаху, центрі міжквартильного розмаху, медіані, половині міжквартильного розмаху, розмаху і т.д.

Відомі й інші робастні оцінки зсуву і масштабу розподілу. Однак всі вони пов'язані з досить складними обчисленнями, ефективність більшості з них визначена тільки для деяких розподілів. Велика частина оцінок має асимптотичний характер, тобто справедлива при  $n \rightarrow \infty$ . Питання про те, як будуть вести себе ці оцінки в реальній ситуації, при кінцевому  $n$  і конкретних видах розподілів, вимагають спеціальних досліджень.

**Висновки.** В даній роботі була проведена оцінка систематичних та випадкових складових похибки при вимірюванні зубчастих коліс. Встановлені методи та засоби вимірювання для оцінки математичного очікування та середнього квадратичного відхилення, заснованих на порядкових статистиках: центрі розмаху, центрі міжквартильного розмаху, медіані, половині міжквартильного розмаху, розмаху і т.д.

#### Інформаційні джерела

1. Локтев Д. А. Современные методы контроля качества цилиндрических зубчатых колес / Д. А. Локтев // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – №4. – С. 6–11.
2. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А.Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 369 с.
3. Сурков И.В. Метрологическое обеспечение процесса контроля зубчатых колес // Тезисы докладов международной научно-практической конференции / И.В. Сурков, Н.В. Сырейщикова.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – С. 225–227.
4. Марков Н.Н. Измерительные зубчатые колеса для комплексного контроля /Н.Н. Марков //Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. Межвузовский сборник № 2. – М.:Машгиз, 1960.–С. 286-312
5. Агапов, С.И. Прибор для оценки кинематической погрешности зуборезного оборудования в производственных условиях /С.И. Агапов // СТИН. -2006.-№ 2. С. 26-29.
6. Taylor V. N., Kuyatt Ch. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Washington, 1994. 25p.
7. Агапов, С.И. Прибор для оценки кинематической погрешности зуборезного оборудования в производственных условиях /С.И. Агапов // СТИН. -2006.-№ 2. С. 26-29.

**Дихтєвський А.В., Квасніков В.П., д.т.н., Возняковський А.О., к.т.н.**  
Национальный авиационный университет

#### ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ И СЛУЧАЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Для контроля всей совокупности параметров зубчатых колес требуется использование сразу целой гаммы средств измерительной техники и комплексов. Многие из них морально устарели, не автоматизированы, не имеют выхода на компьютерные средства и не обеспечивают современного уровня точности, информативности и быстродействия. На сегодняшний день метрологический контроль параметров зубчатых колес базируется на большом количестве измерительного оборудования. Все они имеют ограниченный диапазон измерительных параметров, разную точность и диапазон измеренных значений. Рассмотрен комплекс работ по созданию системы обеспечения единства геометрических параметров*

*зубчатых передач. Это требует пересмотра, систематизации и разработки методов и средств метрологического обеспечения. Рассмотрены эталонную базу в области контроля эвольвенты зубчатого колеса, которая требует ее создания на основе детального анализа новых принципов измерения, необходимости обоснования их точности, расширения диапазона и диапазона измеряемых параметров. Поэтому в статье предложена оценка систематической и случайной составляющих погрешности измерения цилиндрических зубчатых колес. Проведенный анализ погрешностей для реальных условий эксплуатации на этапе предварительных исследований, когда не известен перечень составляющих основной погрешности и не проведена их количественная оценка.*

**Ключевые слова:** шестерня, погрешность, измерительный комплекс, быстроедействие, диагностический канал.

**A. Dihtievskiy., V. Kvasnikov. Ph.D, A. Voznyakovskiy., Ph.D.**  
National Aviation University

### **ESTIMATION OF THE SYSTEMATIC AND RANDOM COMPONENT OF THE MEASUREMENT ERROR OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS**

In order to control the entire set of gear wheels parameters, it is necessary to use a whole range of measuring equipment and complexes at once. Many of them are outdated, unauthorized, have no access to computer tools and do not provide a modern level of accuracy, informationality and speed. To date, the metrological control of gear wheel parameters is based on a large number of measuring equipment. All of them have a limited range of measuring parameters, different accuracy and range of measured values. The complex of works on creation of a system of unity of geometric parameters of gear gears is considered. This requires revision, systematization and development of methods and means of metrological support. The reference base in the field of control of the gear draw gear is considered, which requires its creation on the basis of a detailed analysis of the new principles of measurement, the need to justify their accuracy, the expansion of the range and range of measured parameters. Therefore, the article proposes an estimation of the systematic and random components of the measurement error of cylindrical gear wheels. The analysis of errors for real operating conditions at the stage of previous studies, when the list of components of the basic error is not known and their quantitative assessment is not carried out.

**Keywords:** gear, error, measuring complex, speed, diagnostic channel.

УДК 621.838(03)

Драган А.П., Гороть Є.В.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-11>

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

## ТИСК КОЛОДОК НА ГАЛЬМІВНИЙ ШКІВ В КОЛОДКОВИХ І СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМАХ

*В даній статті проведено уточнення величини нормальних тисків колодки на гальмівний шків і, отже, величину гальмівного моменту колодкових і стрічково-колодкових гальм. Отримано рівняння для визначення гальмівного моменту для різних видів гальм і проведено порівняння результатів розрахунку гальмівного моменту отриманих за нормативними формулами та за формулами отриманими в результаті проведених досліджень.*

**Ключові слова:** Колодкове гальмо, гальмівний шків, гальмівний момент.

**Вступ.** Гальмівні механізми є невід'ємною, найбільш відповідальною частиною вантажопідіймальних машин, що призначені для зупинки, обмеження швидкості та утримання у зваженому стані вантажу. Високі вимоги до гальмівних механізмів забезпечують безаварійну експлуатацію вантажопідіймальних машин. Гальмування швидкості вантажопідіймальних механізмів є наслідком створення значних сил тертя між шківом або дисками, що обертаються, та нерухомими елементами (колодками, стрічками, дисками тощо). Під час гальмування кінетична енергія рухомих мас і елементів підіймального механізму перетворюється на теплову, що спричиняє нагрівання складових частин гальм. Існує багато типів гальм, які можна класифікувати за такими ознаками [4]:

напрямом дії зусиль натискання на гальмівний елемент з радіальним і осьовим замиканням;

конструкцією робочого елемента – колодкові; стрічкові, дискові, конічні тощо;

джерелом створення зусилля – ручне, пружинне, вантажне, гідравлічне, пневматичне, електричне, комбіноване і т.д.

призначенням – стопорне (для зупинки) і обмежуюче швидкість (регулятори швидкості);

принципом дії – автоматичні і керовані оператором;

характером дії приводного зусилля – закритого типу (постійно загальмовані, що розгальмовуються тільки на період виконання певної операції), відкритого типу (загальмовуються тільки для зупинки механізму) та комбіновані (можуть працювати як в закритому, так і у відкритому режимах).

Від стану і надійності їх роботи значною мірою залежить безаварійність і якість проведення спуско-підіймальних операцій.

**Постановка проблеми.** У зв'язку зі збільшенням мас механізмів і машин, швидкостей, частот гальмувань постає необхідність підвищення точності розрахунків деталей і вузлів як машин в цілому, так і гальм. Останні зменшують швидкість машин з заданим уповільненням або зупиняють їх на певному гальмівному шляху, а в підйомно - транспортних машинах утримують вантаж в підвішеному стані при певному коефіцієнті запасу гальмування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основам конструювання, проектування та дослідження гальмівних пристроїв присвячені роботи таких вчених: Бондаренко Л.Н. [6], Вольченко М.О., Вольченко Д.О [5], та інших. Не зважаючи на значну кількість наукових праць, які присвячені даній проблематиці питання точності розрахунку гальмівного моменту дослідженні не достатньо, і не завжди відповідають сучасним вимогам.

**Мета статті.** Уточнити величини нормальних тисків колодки на гальмівний шків і, отже, величину гальмівного моменту колодкових і стрічково-колодкових гальм.

**Матеріал досліджень.** Спочатку розглянемо задачу про навантаження рівномірно - розподілені по дузі кола (рис.1).

1. Це завдання розглянуто в деяких підручниках з теоретичної механіки [1] і опору матеріалів [2], тому коротко наведемо його рішення для викладу поставленого завдання.

Сума проекцій сил  $P$  на вісь  $OY$  внаслідок симетрії щодо осі  $OX$ , дорівнює нулю, і тому їх рівнодіюча спрямована уздовж осі  $OX$ .

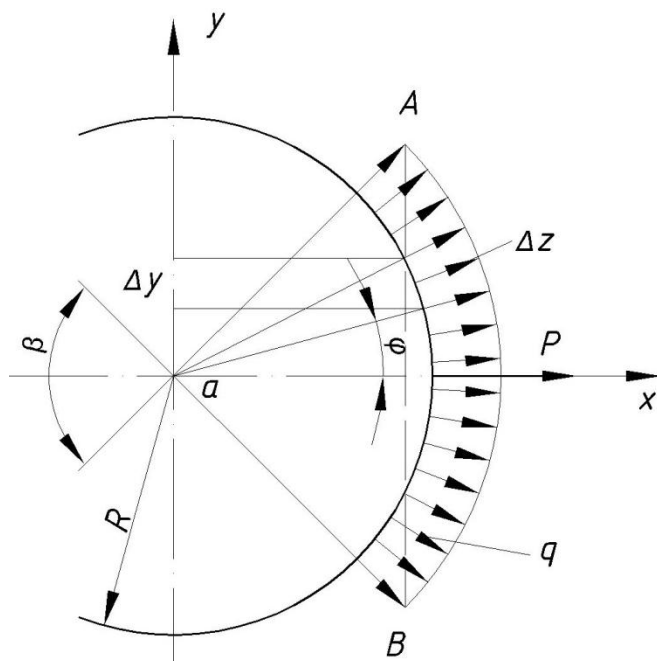


Рис.1. Сили, рівномірно розподілені по довжині дуги кола

По модулю  $P = P_x = \sum q \cdot \Delta l \cdot \cos \varphi$ , де  $q \Delta l$  - сила, що діє на елемент дуги довжиною  $\Delta l$ ;  $\varphi$  - кут утворений цією силою з віссю  $Ox$ , оскільки  $\Delta l \cos \varphi = \Delta y$ , то  $P = q \cdot \sum y = q \cdot AB$ , тобто  $P = q \cdot h$ , де  $h$  - довжина хорди дуги  $AB$ ,  $h = 2 \cdot R \cdot \sin \beta / 2$ . Як бачимо, на відміну від завдань, розглянутих нижче тут присутня довжина хорди дуги.

2. При розрахунку колодкових гальм використовується сила притиснення колодки до шківів  $P$ . Природно, що для розрахунку величини гальмівного моменту, відповідно до закону тертя ковзання, необхідно знати як величину нормальної розподіленої сили  $q$ , так і її суму.

Тому, необхідно вирішити задачу зворотню до попередньої (рис. 2).

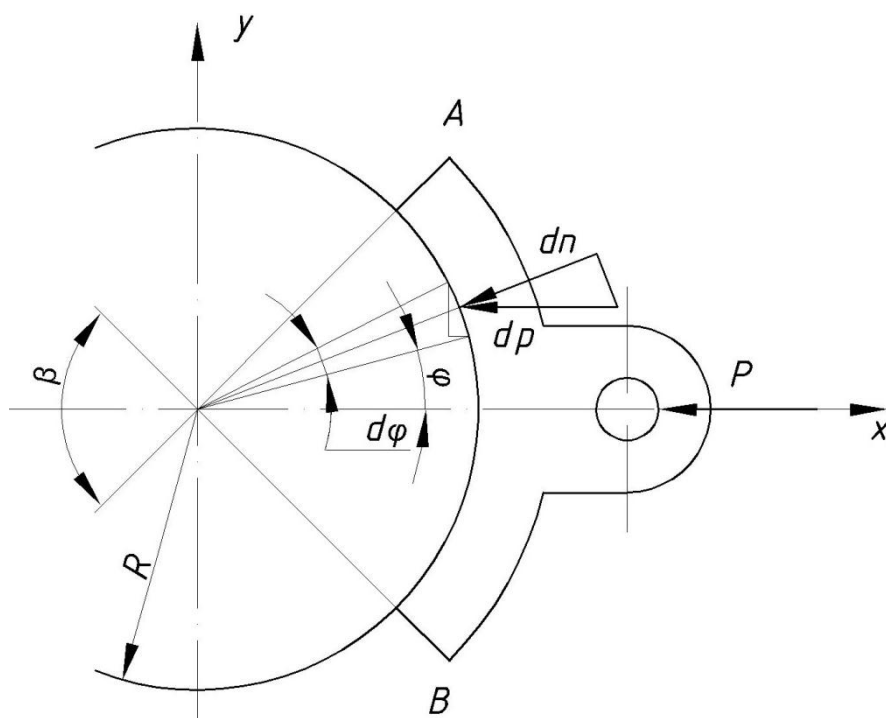


Рис. 2. До визначення нормальних тисків гальмівної колодки на шків.

Елементарна сила, що діє на вісь  $y$  елемента дуги довжиною  $R d\varphi$ :

$$dp = \frac{P}{\beta} \cdot d\beta, \quad (1)$$

нормальна до нього сила

$$dn = dp \cdot \cos \varphi = P/\beta \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (2)$$

Загальна нормальна сила, що діє на циліндр:

$$N = P/\beta \cdot \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} \cos \varphi \cdot d\varphi = 2P/\beta \cdot \sin \beta/2. \quad (3)$$

Виходячи з цього, гальмівний момент, що розвивається двоколодковим гальмом повинен визначатися з виразу:

$$M_{ТД} = 4P \cdot f \cdot \frac{R}{\beta} \cdot \sin \frac{\beta}{2}. \quad (4)$$

Оскільки в колодкових гальмах  $60 \leq \beta \leq 120$ , то необхідно оцінити точність формул (4) і нормативної  $M_T = 2 \cdot P \cdot f \cdot R$  [3, 4].

Залежності  $P$ ,  $N$ ,  $M_T$ ,  $M_{ТД}$  та процентні розбіжності між  $M_T$  і  $M_{ТД}$  в залежності від кута  $\beta$  показані на рис. 3.

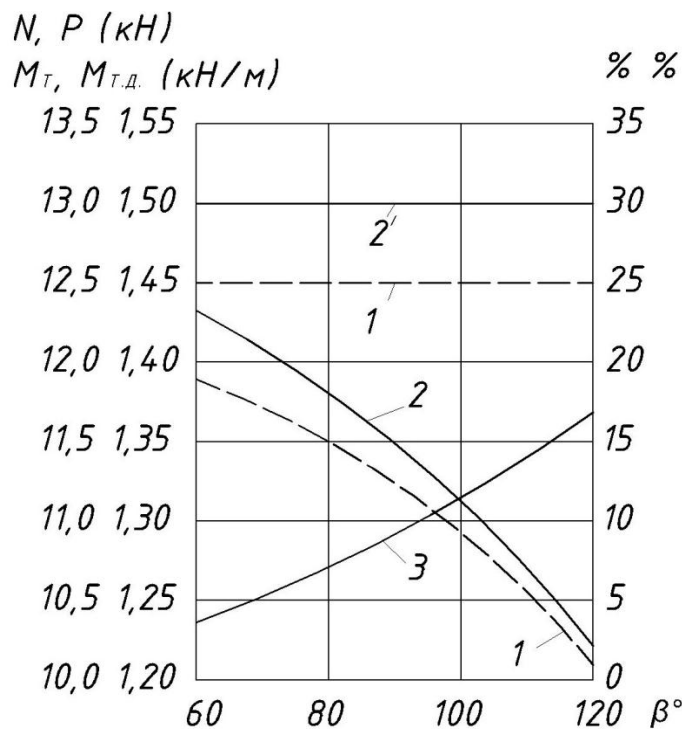


Рис. 3. Залежність від кута обхвату колодкою гальмівного шківів:  
 1, 1' - нормативної і пропонуваної величини притиснення колодки;  
 2, 2' - нормативної і пропонуваної величини гальмівного моменту;  
 3 - процентне розбіжність між моментами.

3. Не менш широкого поширення набули і стрічково-колодкові гальма [5, 6] в яких колодки притискаються до гальмівного шківів за допомогою стрічки.

Надалі розглянемо абсолютно жорстку на згин колодку, оскільки ця задача є аналогом завдань розглянутих вище. З урахуванням не абсолютно жорсткої колодки завдання розглянуто в [2].

Спочатку розглянемо одну колодку, оскільки порівняння формули (4) з нормативною, показує їх істотну різницю як у результатах розрахунків, так і в написанні.

Будемо вважати, що стрічка має натяг набігаючої вітки  $S_H$ , а збігаючої  $S_C$ . Якщо припустити, що в силіному трикутнику, який визначає тиск на гальмівний шків силами  $S_H$  і  $S_C$ , різниця в кутах між ними незначна, то тиск на шків складе (рис. 4):

$$P = (S_H + S_C) \cdot \cos \beta/2. \quad (5)$$

Оскільки  $M_{ТД} = (S_H - S_C)R$ , то відповідно до формули (4):

$$\frac{S_H}{S_C} = \frac{\beta + 2 \cdot f \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2}}{\beta - 2 \cdot f \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2}} = \frac{1 + \frac{f}{\beta} \cdot \sin \beta}{1 - \frac{f}{\beta} \cdot \sin \beta}. \quad (6)$$

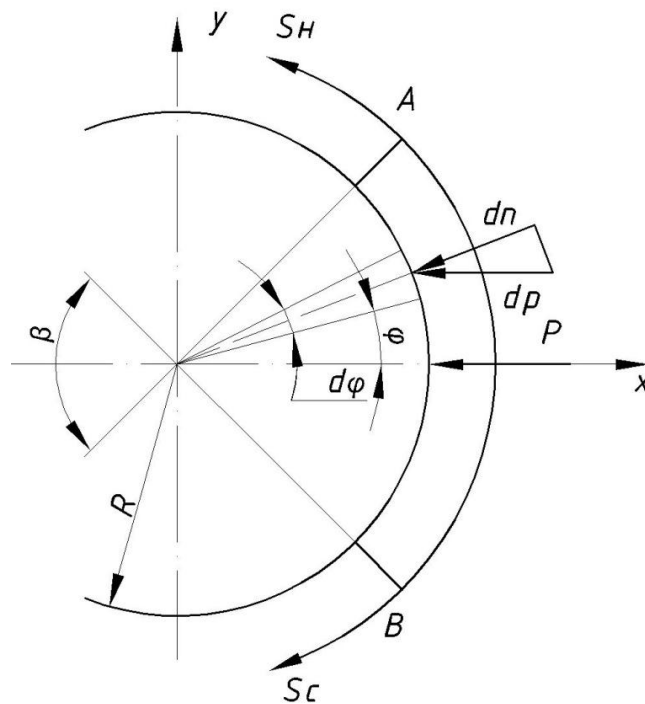


Рис. 4. Розрахункова схема стрічково-колодкового гальма (одна колодка).

На рис. 5 показані залежності  $S_H / S_C$  від кута  $\beta$ , отримані за формулою (6) і для порівняння ці ж залежності для гнучкої нерозтяжної нитки (по Ейлеру).

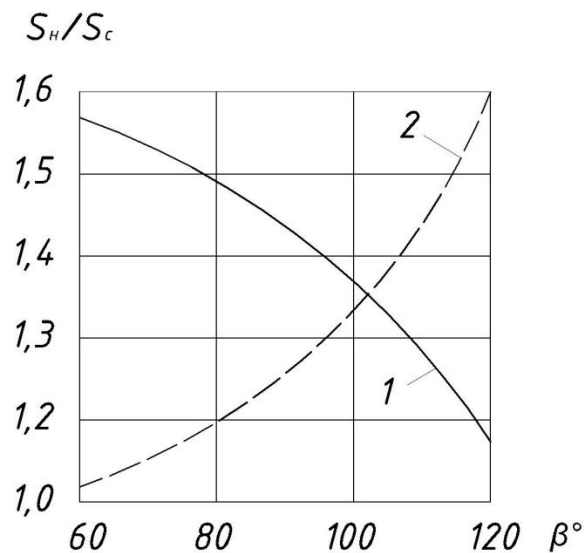


Рис. 5. Залежність  $S_H / S_C$  від кута обхвату шківів:  
1 - колодкою, що притискається стрічкою (6);  
2 - гнучкою нерозтяжною ниткою (по Ейлеру).

Формула (6) при малому куті  $\beta$  набуває вигляду:

$$\frac{S_H}{S_C} = \frac{1+f}{1-f} \quad (7)$$

або

$$f = \frac{S_H - S_C}{S_H + S_C}. \quad (8)$$

Аналіз отриманих залежностей і графіків на рис. 3 і рис. 5 дозволяє зробити наступні висновки і пропозиції.

1. Нормативна формула для визначення гальмівного моменту колодкового гальма відповідає притисненню двох площин і не враховує того, що нормальний тиск колодки на шків не дорівнює тиску на колодку.

2. В стрічково-колодкових гальмах при абсолютно жорсткій на згин колодці необхідно враховувати кут обхвату колодкою шківів при куті  $\sin(\beta/2) \approx \beta/2$ .

3. Нормативна величина гальмівного моменту, наприклад, при куті обхвату колодкою  $80^\circ$ , менше реального приблизно на 7%.

4. Відношення натягів між набігаючою і збігаючою вітками стрічково-колодкового гальма залежить від кута охоплення колодкою шківів, наприклад, при куті  $20^\circ$ , різниця становить близько 30% у порівнянні з величиною, отриманою без урахування абсолютної жорсткості колодки.

### Література

1. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.2/Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. – М.: Накаа, 1965. – 624с.

2. Довідник з опору матеріалів / Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. - К.: наук. думка, 1988. - 736с.

3. Справочник по кранам. В 2 т. Т.2/Александров М.Л., Гохберг М.М., Ковин А.А. и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 559с.

4. Тормозные устройства. Справочник/ Александров М.П., Лысяков А.Г., Федосеев В.Н. и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 319с.

5. Крижанівський Є.І., Вольченко М.О., Вольченко Д.О., Пургал М.П. Стрічково-колодкові гальма. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – 230с.

6. Бондаренко Л.Н. Определение средних радиусов трения конических и дисковых тормозов/ Подъемные сооружения. Специальная техника. – Одесса: НТА «Подъемные сооружения», 2009. - № 5(93). – С. 26 – 28.

**Драган А.П., Гороть Е.В.**

ОП НУБиП України «Бережанський агротехнічний інститут»

### ДАВЛЕНИЕ КОЛОДОК НА ТОРМОЗНОЙ ШКИВ В КОЛОДОЧНЫХ И ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗАХ

*В данной статье проведено уточнение величины нормальных давлений колодки на тормозной шкив и, следовательно, величину тормозного момента колодочных и ленточно-колодочных тормозов. Получено уравнение для определения тормозного момента для различных видов тормозов и проведено сравнение результатов расчета тормозного момента полученных по нормативным формулам и по формулам полученным в результате проведенных исследований.*

**Ключевые слова:** колодочный тормоз, тормозной шкив, тормозной момент.

**Drahan A.P., Horot E.V.**

Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany agrotechnical institute»

### THE PRESSURE OF THE PADS ON THE BRAKE PULLEY IN THE PANEL AND BELT PADS BRAKES

*In this article, the specification of the magnitude of the normal pressure pads on the brake pulley and, consequently, the magnitude of the braking moment of shoe and tape and shoe brakes. An equation was obtained for determining the braking torque for various types of brakes and a comparison was made of the calculation results for the braking torque obtained using standard formulas and formulas obtained as a result of the studies performed.*

**Keywords:** shoe brake, brake pulley, braking torque.

УДК 681.518.3 (075.8)

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-12>

Єременко В. С., Осінцева М. Б.

НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

### ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАБОРА В ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

*В даній статті представлено аналіз полігармонічних сигналів за допомогою перетворення Д. Габора. Розглянуто різновиди часових вікон і їх характеристики. Досліджено застосування часових вікон в задачі аналізу нестационарних сигналів, за допомогою програми, розробленої у пакеті Mathcad. Визначено переваги і недоліки перетворення Габора.*

**Ключові слова:** нестационарні сигнали, аналіз сигналів, перетворення Габора, віконні функції.

**Постановка задачі.** Інформаційні сигнали, що мають нестационарну структуру, зустрічаються в різних сферах науки і техніки: фізиці, електротехніці, медицині, і т.д. Для їх дослідження і отримання додаткової корисної інформації застосовуються різні математичні перетворення, що дозволяють переводити сигнал з часової в частотну область і навпаки.

Класичним в теорії аналізу сигналів є перетворення Фур'є, що дозволяє отримати інформацію про сигнал в частотній області. Але перетворення Фур'є не дає можливості локалізувати в часі частотні компоненти, тому має своє застосування лише для стаціонарних процесів. Якщо ж необхідно дослідити зміни нестационарного сигналу при забезпеченні високої роздільної здатності і по частоті і по часу, то перетворення Фур'є виявляється непридатним. Одним з варіантів усунення цього недоліку є використання перетворення Деніса Габора, або як його ще називають, «локальне перетворення Фур'є» (STFT – Short-Time Fourier Transformation) [1], в якому замість інтегрування сигналу на усьому проміжку часу спостереження розглядається деякий локальний проміжок.

Основною задачею даного дослідження є застосування перетворення Д. Габора до аналізу нестационарних сигналів.

**Огляд літератури.** Перетворення Д. Габора було запропоновано в 1948 році для можливості опрацювання нестационарних процесів. Цей підхід пропонує нестационарний сигнал  $y(t)$  розглядати як стаціонарний на деяких проміжках часу відтворення сигналу. В кожному з цих проміжків розраховується перетворення Фур'є звичайним методом. Якісні характеристики сигналу, отриманого після перетворення Д. Габора можна отримати шляхом підстановки і вибору вікна та його ширини. Вибір оптимальних параметрів вікна базується на характеристиках вхідного сигналу, таких як амплітуда, частота, тривалість сигналу, його локальні зміни і т.д.

В даному дослідженні використано інформаційні сигнали локального методу вільних коливань. Сигнали, отримані під час дослідження вуглепластикових пластин, що були піддані циклічному навантаженню досліджуються із застосуванням віконних функцій для виділення локальних проміжків, на яких здійснювалося перетворення.

Результатом перетворення Деніса Габора є функція  $\Phi_w(f, t)$ , що залежить як від частоти, так і від часу:

$$\Phi_w(f, t^2) = \int [y(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-2\pi f t}] d\tau \quad (1)$$

де  $w(\cdot)$  – функція вікна, що локалізована в околі точки  $t = \tau$ .

Функція вікна переміщається із заданим кроком зсуву по координаті часу і дозволяє за декілька кроків дослідити сигнал на усьому проміжку існування. Отже, результатом віконного перетворення є ряд спектрів, яким відображається зміна спектра сигналу по інтервалах зсуву вікна перетворення. Розмір вікна накладає на отриманий спектр обмеження на роздільну здатність по частоті, а обмеження по високочастотним складовим накладається часом дискретизації сигналу.

Найчастіше за функцію  $w(\cdot)$  береться функція Гауса:  $w(\cdot) = e^{-(a \cdot \tau^2)/2}$  [2], в якій параметр  $a$  задає ширину вікна, оскільки вона забезпечує малі спотворення спектра завдяки граничним значенням і тим самим зменшує прояви ефекту Гібса.

В якості вікна перетворення Габора можуть використовуватися також інші функції: прямокутна, трикутна, функції Хенінга, Кайзера, Хемінга, Блекмена і т.д. [3]. Розглянемо математичне представлення деяких з них.



При використанні прямокутного вікна всі функції  $w(\cdot)$  рівні одиниці. Прямокутне вікно вирізає проміжок існуючого сигналу, при цьому форма сигналу не змінюється. Якщо на початку і в кінці відрізка значення сигналу відрізняються і відбувається розтікання спектру.

Вікно Хенінга розраховується за формулою:

$$w_n = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi \cdot n/N)] \quad (2)$$

де:  $0 \leq n \leq N$ ,  $L = N+1$ ,

$L$  – розмір вікна у відліках. Амплітудний спектр вікна Хенінга зменшується зі збільшенням частоти скоріше, ніж амплітудний спектр прямокутного вікна.

Функція вікна Хемінга має вигляд:

$$w_n = 0,54 - 0,46 \cdot \cos(2\pi \cdot n/N) \quad (3)$$

де:  $0 \leq n \leq N$ ,  $L = N+1$ . Амплітудний спектр цього вікна зменшується так само швидко, як і при використанні вікна Хенінга. Але за рахунок невеликої різниці в коефіцієнтах, в даному випадку менше проявляються бокові пелюстки амплітудного спектру.

Вікно Блекмена має ще один доданок косинуса, на відміну від вікон Хенінга і Хемінга. Цим самим забезпечується ще більш швидке спадання амплітудного спектру, ніж в попередніх випадках. Вікно Блекмена математично описується формулою:

$$w_n = 0,42 - 0,5 \cdot \cos(2\pi \cdot n/N) + 0,08 \cdot \cos(4\pi \cdot n/N) \quad (4)$$

де:  $0 \leq n \leq N$ ,  $L = N+1$ .

Вікно Кайзера розраховується за формулою:

$$w_n = I_0 \cdot [\pi \cdot \beta \sqrt{(1 - (2n/N - 1)^2)}] / I_0 \cdot (\pi \cdot \beta) \quad (5)$$

де:  $0 \leq n \leq N$ ,  $L = N+1$ ,

$I_0$  – модифікована функція Бесселя нульового порядку.

Вікно Кайзера має додатковий параметр  $\beta$  – параметр, що визначає ширину вікна. Чим вужче буде вікно, тим ширше буде амплітудний спектр сигналу після його перетворення і відбувається придушення високих гармонік.

Наведемо основні параметри обраних вікон (табл. 1) за [5].

Таблиця 1.

Основні параметри вікон

Вікно	Максимальний рівень бокових пелюсток, дБ	Швидкість спаду бокових пелюсток, дБ/октава	Когерентне підсилення	Еквівалентна шумова смуга, бин	Паразитна АМ, дБ	Максимальна втрата перетворення, дБ
Прямокутне	-13	-6	1,0	1,0	3,92	3,92
Гаусівське ( $\alpha = 3,0$ )	-55	-6	0,43	1,64	1,25	3,40
Кайзера ( $\alpha = 3,0$ )	-69	-6	0,40	1,80	1,02	3,56

**Основний матеріал.** З наведених в огляді літератури віконних функцій перетворення, можемо сказати, що даний підхід має багато інструментів для аналізу нестационарних сигналів. Дослідження проводиться на реальних сигналах, отриманих з ушкоджених та бездефектних зон зразків вуглепластикових панелей. Такі сигнали отримуються при контролі методом вільних коливань. *Метод вільних коливань* полягає у збудженні вільно затухаючих пружних коливань в деталі за допомогою одиничного каліброваного удару, аналізі параметрів коливань (амплітуда, частота, час затухання), за результатами якого роблять висновок про наявність чи відсутність дефектів. [4] За допомогою цього методу можна визначити тріщини, місця порушень однорідності матеріалу та накопичень втомленості матеріалу. Розрізняють інтегральний і

локальний метод вільних коливань, що застосовуються для контролю відповідно всього виробу або його окремої зони. Найбільш ефективним цей метод є для контролю конструкцій, що містять шари неметалічних матеріалів з малим модулем пружності і високим коефіцієнтом загасання пружних коливань (гуми, пінопласти, полімерні композиційні матеріали).

Для даного дослідження було використано сигнал, отриманий з ушкодженої зони зразків вуглепластикових панелей.

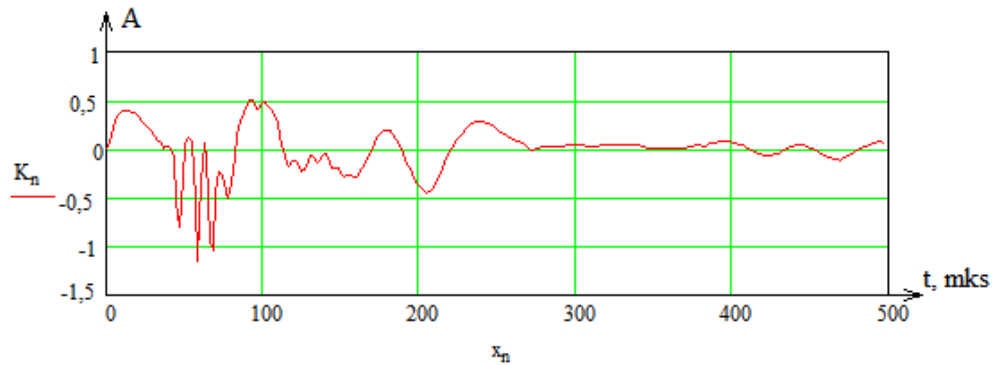


Рис. 1. Сигнал, отриманий з ушкодженої зони зразка

Досліджуваний сигнал є нестационарним. Високочастотні складові, які відповідають типу ушкодженості панелі знаходяться на початку досліджуваного сигналу. При використанні класичного перетворення Фур'є їх енергія розсіюється по всій довжині сигналу. Що унеможливує точне визначення частоти цих гармонік. Тому для проведення дослідження застосуємо вікна: прямокутне, гаусівське та вікно Кайзера.

Спектри сигналу з прямокутним вікном зображено на рисунку 2:

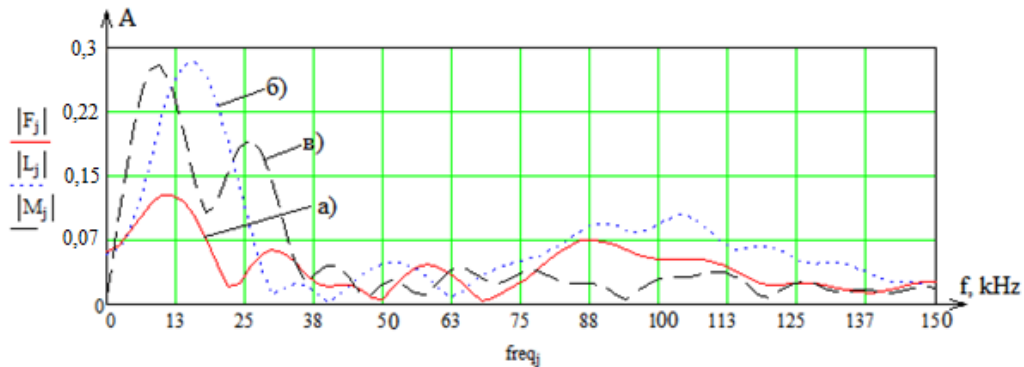


Рис. 2. Спектри сигналу після проходження через прямокутне вікно:  
а) зсув вікна – 30 mks, б) зсув вікна – 50 mks, в) зсув вікна – 70 mks

На рисунку 2, а) зображено спектр частини сигналу, який описує високочастотні складові досліджуваного сигналу. З графіка видно, що спектр є неінформативним, оскільки неможливо чітко визначити на якій частоті зосереджена енергія. При зсуві вікна по сигналу також спостерігається рівномірна розоділеність енергії по всій частині сигналу, яку вирізає прямокутне вікно.

При перетворенні Габора застосовується гаусівська віконна функція виду:

$$g_{\alpha}(t) = (4 \cdot 5 \cdot \pi)^{\frac{-1}{2}} \cdot e^{\frac{[-(t-b)^2]}{4 \cdot \alpha}} \quad (6)$$

де  $p$  – довжина сигналу,  $b$  – зсув гаусівського вікна вздовж сигналу,  $\alpha$  – ширина вікна. Підібравши зсув і ширину вікна, такі щоб високочастотні складові були охоплені вікном.

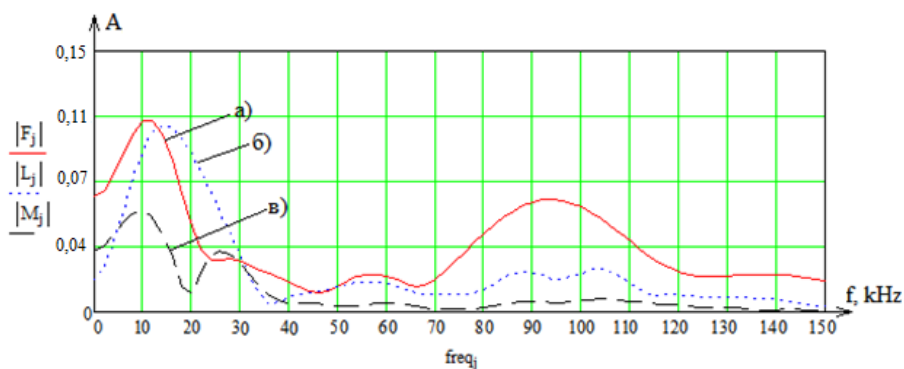


Рис. 3. Спектри сигналу після проходження через вікно Габора: а) зсув вікна – 30 mks, б) зсув вікна – 50 mks, в) зсув вікна – 70 mks

На рисунку 3 (а, б, в) зображено спектри частин сигналу, вирізаних віконною функцією Гауса при зсуві, відповідно на 30, 50 і 70 мікросекунд (mks). На даному графіку бачимо, що спектри несуть інформацію про наявність неушкодженої зони сигналу (3, в), про наявність деяких височастотних складових, які для нашого дослідження є неінформативними (3,б). Також зі спектра 3, а) можна виділити наявність ушкодженої зони сигналу по височастотних складових, які зосереджені на частоті  $\approx 95$  кГц.

Наведемо приклад проходження досліджуваного сигналу через вікно Кайзера. Задаємо формулу (5) і необхідні значення наступним чином:

Спектри досліджуваного сигналу з вікном Кайзера:

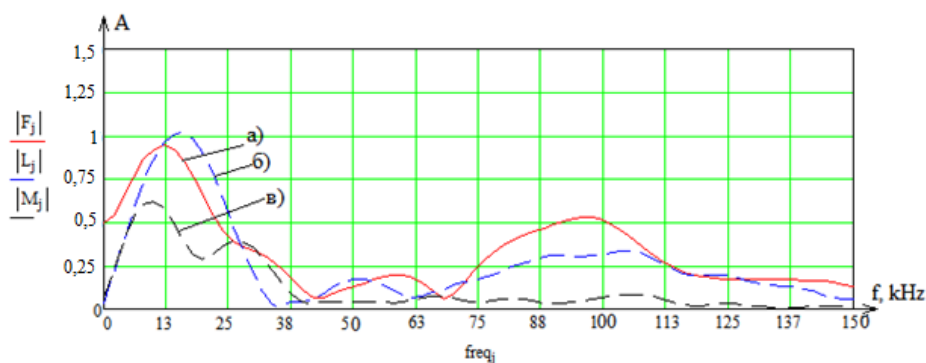


Рис. 4. Спектри сигналу після проходження через вікно Кайзера: а) зсув вікна – 15 mks, б) зсув вікна – 25 mks, в) зсув вікна – 45 mks

Рисунок 4 показує спектри частин досліджуваного сигналу, вирізаних вікном Кайзера. З отриманих спектрів неможливо оцінити наявність ушкоджених зон, оскільки спектри 3,а) і 3, б) в зонах наявності височастотних складових розпливаються і не видно чіткого зосередження енергії сигналу на якійсь конкретній частоті. Спектр частини сигналу, на якій немає височастотних складових 3, в) показує наявність неушкодженої зони. Спектри сигналів отримані при використанні віконних функцій шириною 75. Ширину вікна було обрано таким чином, щоб дослідити найбільш інформативний проміжок сигналу, як показано на рисунку 5, а також менш інформативні проміжки, для порівняння.

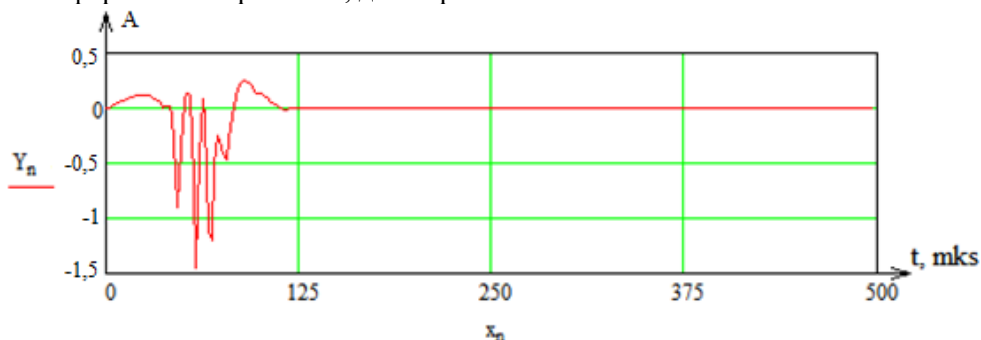


Рис. 5. Досліджуваний сигнал після проходження через вікно.

Виходячи з отриманих спектрів можемо зробити висновки. Використання прямокутного вікна (рис.2) не дає можливості чітко оцінити наявність або відсутність ушкодженої зони панелі, оскільки спектр сигналу практично рівномірно розподілений по частоті. З використанням вікна Кайзера (рис. 4) можемо спостерігати, що найбільша енергія сигналу зосереджена на частоті: від 75 до 110 кГц. На спектрі сигналу, отриманого після проходження віконної функції Гауса (рис. 3) більш чітко можна спостерігати наявність високочастотних складових сигналу.

**Висновки.** В ході даної роботи було проаналізовано можливості застосування перетворення Деніса Габора для дослідження часових змін характеристик полігармонічних сигналів. В середовищі Mathcad розроблено програму визначення спектра сигналу після проходження через вікна: Габора, Кайзера і прямокутне вікно. З отриманих спектрів можемо сказати, що найбільш оптимальним для такого сигналу є гаусівське вікно, оскільки на спектрі чітко розпізнаються високочастотні складові досліджуваного сигналу.

#### Інформаційні джерела

1. Crochiere R. A weighted overlap-add method of short-time Fourier analysis/synthesis // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing. – 1980. – Vol. ASSP-28. – N 2. – P. 99 – 102.
2. Файнзілберґ Л. С. Інформаційні технології обробки сигналів складної форми. – Київ: Наукова думка, 2008 – 334 с.
3. Павлейно М. А., Ромаданов В. М. Спектральные преобразования в MATLAB. – Учебно-методическое пособие. – Санкт-Петербург, 2007 – 160 с.
4. Механізми і технології. Визначення і терміни. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mehanik-ua.ru/opredeleniya-i-terminy/802-metod-vilnikh-kolivan.html>
5. «Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье» Ф. Дж. Херрис (член ИИЭР).

**Еременко В. С., Осинцева М. Б.**  
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сикорського»

#### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГАБОРА В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ

*В данной статье представлено анализ полигармонических сигналов с помощью преобразования Д. Габора. Рассмотрено разновидности временных окон и их характеристики. Исследовано применение временных окон в задаче анализа нестационарных сигналов с помощью программы, разработанной в среде Mathcad. Определено преимущества и недостатки преобразования Габора.*

**Ключевые слова:** нестационарные сигналы, анализ сигналов, преобразование Габора, оконные функции.

**Eremenko V., Osintseva M.**  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

#### THE TRANSFORMATION OF HAVOR IN THE PROBLEM OF ANALYSIS OF NONSTATIONARY SIGNALS

*In this paper an analysis of nonstationary signals is presented using the transformation of Habor. Variants of time windows and their characteristics are considered. Investigation of the use of time windows in the problem of analysis of nonstationary signals, using the program developed in the package Mathcad. Was determined the advantages and disadvantages of Habor's transformation.*

**Keywords:** nonstationary signals, signal analysis, transformation of Habor, window functions.

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-13>С.В. Луньов<sup>1</sup>, Ю.А. Удовицька<sup>1</sup>, М.В. Хвищун<sup>1</sup>, С.А. Мороз<sup>1</sup>, В.Т. Маслюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, вул. Львівська 75, м. Луцьк, 43018, Україна, luniovsr@ukr.net<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська 21, м. Ужгород, 88017, Україна, volodymyr.maslyuk@gmail.com

### ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ ДАТЧИКА ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Встановлено на основі вимірювань інфрачервоної Фур'є-спектроскопії та ефекту Холла, що основними типами радіаційних дефектів в опромінених електронами монокристаллах кремнію є кисневмісні комплекси, до складу яких входить міжвузловий вуглець та легуюча домішка. Досліджувані монокристали кремнію в процесі вирощування за методом Чохральського легувались домішкою фосфору, концентрацією  $N_d=2,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , та в подальшому опромінювались при кімнатній температурі потоком електронів  $1 \cdot 10^{17} \text{ ел./см}^2$  з енергією 12 МеВ. Показано, що для таких технологічних умов вирощування та опромінення монокристалів кремнію потоком швидких електронів є досить ефективним утворення в об'ємі даних монокристалів А-центрів, додатково модифікованих домішкою фосфору (комплексів VO<sub>i</sub>P). Радіаційна обробка досліджуваних монокристалів кремнію дозволила підвищити їх коефіцієнт фоточутливості при кімнатній температурі більше як в 2 рази для довжини хвилі інфрачервоного випромінювання  $\lambda \sim 11,6 \text{ мкм}$ , що відповідає поглинанню радіаційними дефектами, яким належать комплекси C<sub>i</sub>O<sub>i</sub> (міжвузловий вуглець - кисень). Показано, що при температурах нижчих за кімнатну з'являється ще одна смуга поглинання при  $\lambda \sim 11,3 \text{ мкм}$ , що відповідає комплексам VO<sub>i</sub>P. Запропонована технологія одержання монокристалів кремнію може бути використана для створення на їх основі елементів інфрачервоної техніки для довжин хвиль  $\lambda \sim 11,6 \text{ мкм}$  та  $\lambda \sim 11,3 \text{ мкм}$ ., які зможуть функціонувати в широкому діапазоні температур.*

**Ключові слова:** монокристали кремнію, радіаційні дефекти, фоточутливість, А-центри, інфрачервона Фур'є-спектроскопія, ефект Холла.

**Вступ.** Одним з найбільш перспективних напрямків розвитку елементної бази сучасної мікро-та наноелектроніки є розробка різних напівпровідникових датчиків. Серед таких приладів значна увага приділяється сенсорам інфрачервоного випромінювання, які використовуються для виявлення зон високих температур і можливих осередків виникнення пожеж, зондування навколишнього середовища на предмет забруднення шкідливими та отруйними речовинами, ранньої діагностики запальних, ракових та інших захворювань, визначення зон теплових втрат, вирішення задач національної безпеки та обороноздатності країни. Цілеспрямований вплив різних фізико активних полів, таких як радіаційні, температурні, електричні, магнітні, та легування різного роду домішками дозволяє одержувати на основі напівпровідникових матеріалів різні електронні прилади та сенсори функціональної електроніки з наперед прогнозованими характеристиками. Інтенсивний розвиток напівпровідникової електроніки та напівпровідникового матеріалознавства сприяє вдосконаленню властивостей вже як існуючих, так і пошуку та розробки нових напівпровідникових матеріалів. Такий напівпровідниковий матеріал, як кремній, незважаючи на всебічну вивченість його властивостей, був і залишається основним матеріалом електронної техніки [1].

Модифікація фізичних властивостей напівпровідників за рахунок радіаційної обробки в багатьох випадках може служити ефективним технологічним інструментом, який дозволяє отримувати якісні напівпровідникові матеріали, істотно вдосконалити та здешевити виробництво багатьох типів напівпровідникових приладів [2, 3]. В даному сенсі монокристалічний кремній з дефектами структури, які можна створити цілеспрямовано за рахунок радіаційного опромінення, може бути перспективним матеріалом для конструювання сенсорів інфрачервоного випромінювання.

**Експериментальні результати та їх обговорення.** Для монокристалів кремнію, вирощених за методом Чохральського, з малим вмістом легуючих домішок, основними радіаційними дефектами є А-центри, дивакансії та комплекси C<sub>i</sub>O<sub>i</sub> [4, 5]. Утворення при

електронному або  $\gamma$  - опроміненні E-центрів, дивакансій, комплексів  $C_iC_s$  характерним є для кремнію, вирощеного методом безтигельної зонної плавки [4, 6]. Проте, мало вивченим на сьогодні є дефектоутворення в кремнії з середнім та сильним рівнем легування при енергіях електронного опромінення більше 10 МеВ. В даному випадку концентрація легуючої домішки буде суттєво впливати на ефективність введення при опроміненні вище розглянутих дефектів і також на ймовірність утворення нових радіаційних дефектів. Також в опроміненому кремнії швидкими електронами з енергією  $E > 10$  МеВ поряд з точковими дефектами починають утворюватись області розвпорядкування [7]. Тому метою даної роботи було дослідження впливу опромінення швидкими електронами з енергією 12 МеВ на фоточутливість монокристалів кремнію, легованих домішкою фосфору. Концентрація легуючої домішки фосфору для досліджуваних зразків кремнію, вирощених за методом Чохральського, складала  $N_d = 2,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для ідентифікації природи утворених радіаційних дефектів проводились вимірювання інфрачервоної Фур'є-спектроскопії та ефекту Холла. На рис. 1 представлено спектри поглинання для монокристалів n-Si, опромінені потоком електронів  $1 \cdot 10^{17} \text{ ел./см}^2$ .

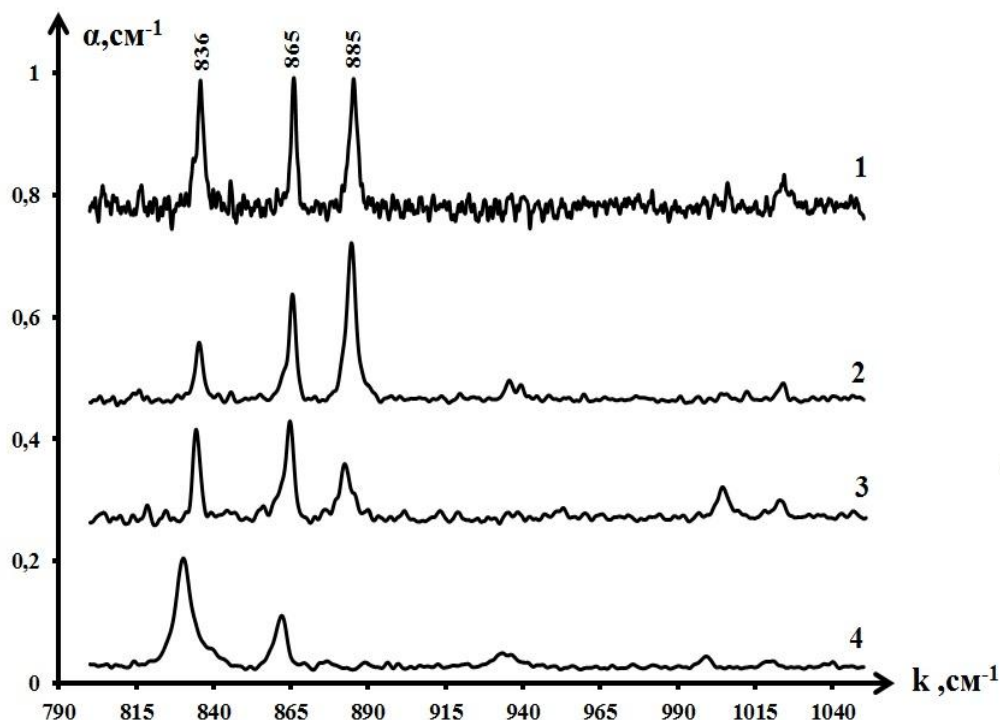


Рис. 1. Спектри поглинання для опромінених монокристалів кремнію потоком електронів  $1 \cdot 10^{17} \text{ ел./см}^2$ , досліджені при різних температурах Т, К: 1 – 10, 2 – 80, 3 – 150, 4 – 300.

Лінії поглинання з частотами 836 та 885  $\text{см}^{-1}$  відповідають А-центру (комплекс  $VO_i$ ). Даний дефект вносить в заборонену зону кремнію глибокий акцепторний рівень  $E_c - 0,17 \text{ eV}$  і спостерігається в спектрах ІЧ-поглинання як в нейтральному (лінія поглинання 836  $\text{см}^{-1}$ ), так і негативно зарядженому (лінія поглинання 885  $\text{см}^{-1}$ ) станах. Лінія поглинання з частотою 865  $\text{см}^{-1}$  відповідає комплексу  $C_iO_i$ , який може перебувати в нейтральному та позитивно зарядженому станах [8]. При радіаційному опроміненні вуглець, згідно з обмінним механізмом Воткінса, виштовхується власними міжвузлями з вузлів у міжвузлове положення з утворенням стабільного дефекту ( $C_i$ ) [9]. При дифузії у ґратці міжвузловий вуглець ( $C_i$ ) ефективно взаємодіє з домішками, утворюючи електрично активні дефекти. У кремнії, вирощеному за методом Чохральського,  $C_i$  ефективно взаємодіє з міжвузловим киснем ( $O_i$ ), в результаті чого утворюється комплекс  $C_iO_i$ . Даний комплекс є стабільним до температур  $T = 600 \text{ K}$  і створює в забороненій зоні кремнію глибокий рівень  $E_v + 0,35 \text{ eV}$ . Енергія активації радіаційних дефектів для опроміненого кремнію потоком електронів  $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ ел./см}^2$ , визначена на основі температурних залежностей концентрації електронів (рис. 2, крива 2), виявилась рівною  $E_A = E_c - (0,107 \pm 0,005) \text{ eV}$ , що відповідає А-центру, який додатково модифікований домішкою фосфору (комплекс  $VO_iP$ ) [10].

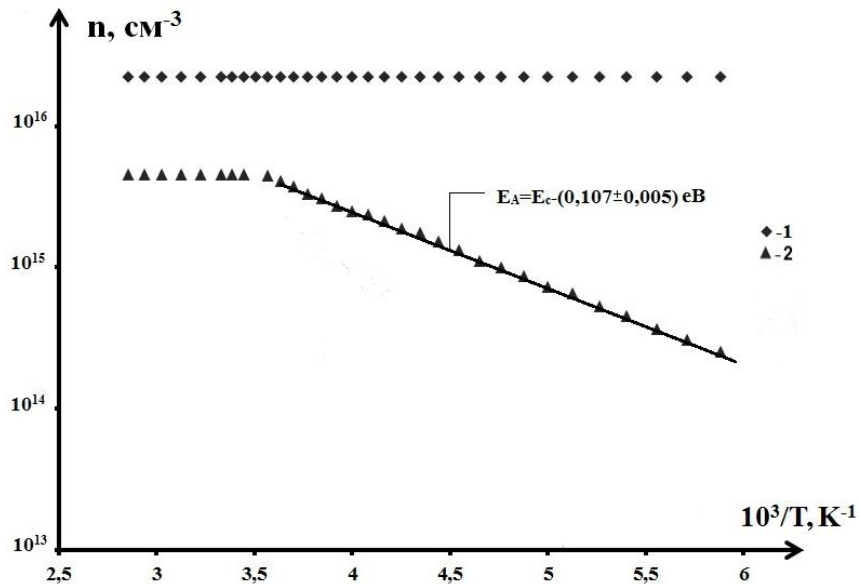


Рис. 2. Температурні залежності концентрації електронів для опромінених монокристалів кремнію потоком електронів  $\Phi$ , ел./см<sup>2</sup>: 1 – 0, 2 -  $1 \cdot 10^{17}$ .

При температурах вищих за кімнатну радіаційні дефекти, які належать комплексам VO<sub>i</sub>P, будуть повністю іонізованими, оскільки концентрація електронів виходить на насичення (рис. 2, криві 2), а в спектрі поглинання зникає лінія 885 см<sup>-1</sup> (рис. 1, крива 4), що відповідає негативно зарядженому стану А-центра. Глибокий рівень  $E_V + 0,35eV$  в даному випадку буде повністю заповнений електронами і для всього досліджуваного діапазону температур не буде проявлятися його іонізація.

Для кількісного аналізу ролі утворених радіаційних дефектів у формування нових областей фоточутливості в опроміненому кремнії потоком електронів  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> проводилась оцінка відносного збільшення фоточутливості для довжин хвиль інфрачервоного випромінювання, при яких спостерігається максимум коефіцієнта поглинання для електрично активних комплексів VO<sub>i</sub>P та C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>.

Відносне зростання коефіцієнта фото чутливості можна представити так:

$$\delta = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0}, \tag{1}$$

де  $\alpha_{\max}$ ,  $\alpha_0$  - значення коефіцієнтів поглинання в максимумі та біля основи піків в спектрі поглинання, що відповідають комплексам VO<sub>i</sub>P та C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>, відповідно  
 Результати розрахунків на основі виразу (1) та експериментальних даних рис. 1 представлено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Відносне зростання коефіцієнта фоточутливості для опромінених монокристалів кремнію електронами з енергією 12 МеВ та потоком  $1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup>

T, K	$\delta$	
	C <sub>i</sub> O <sub>i</sub>	VO <sub>i</sub> P
10	6,22	4,81
80	3,61	3,1
150	3,22	2,48
300	2,32	-

Як слідує з даної таблиці, опромінення досліджуваних зразків кремнію електронами з енергією 12 МеВ та потоком  $1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> дозволяє підвищити коефіцієнт фоточутливості при кімнатній температурі більше як в 2 рази для довжини хвилі інфрачервоного випромінювання  $\lambda \sim 11,6$  мкм, що відповідає комплексам C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>. За рахунок поглинання ІЧ-випромінювання комплексами VO<sub>i</sub>P при температурах нижчих за кімнатну з'являється ще одна смуга

поглинання при  $\lambda \sim 11,3$  мкм, для якої, як і для смуги поглинання  $\lambda \sim 11,6$  мкм, при зниженні температури відносно значення коефіцієнта фоточутливості зростає.

**Висновки.** Проведенні дослідження дозволили встановити природу утворених при електронному опроміненні основних типів радіаційних дефектів в монокристалах кремнію, легованих домішкою фосфору  $N_d = 2,2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. На основі вимірювань ефекту Холла було показано, що для досліджуваних монокристалів кремнію є досить ефективним утворення нового типу радіаційних дефектів, що належать комплексам VO<sub>i</sub>P. Утворення в монокристалах n-Si <P> при електронному опроміненні електрично активних дефектів, що належать комплексам VO<sub>i</sub>P та C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>, дозволило в широкому температурному інтервалі підвищити фоточутливість даних монокристалів.

Одержані результати можуть знайти своє практичне використання для конструювання на основі опроміненого кремнію, який легований домішкою фосфора заданої концентрації, елементів інфрачервоної техніки, таких як тепловізори, пірометри, пристрої для самонаведення на ціль снарядів і ракет, інфрачервоні приціли і т.д., для довжин хвиль  $\lambda \sim 11,6$  мкм та  $\lambda \sim 11,3$  мкм., які зможуть функціонувати в широкому діапазоні температур.

### Інформаційні джерела

1. Fumio, S. (2012). Semiconductor Silicon Crystal Technology. Elsevier Science & Technology, 435.
2. Sun, Y., Chmielewski, A. G. (2017). Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing: Vol. 1. Warszawa: Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 244.
3. Gradoboev, A. V., Simonova, A. V. (2017). Radiation technologies in the production of semiconductor devices. Physical and technical problems in science, industry and medicine: a collection of abstracts of reports of the IX International Scientific and Practical Conference, Tomsk, September 21-22, 2017. Tomsk: TPU Publishing House, 69.
4. Semeniuk, A. K. (2001). Radiation Effects in Multivalley Semiconductors. Lutsk: Nadstyr'ya, 324.
5. Murin, L. I. (1987). On the electrical activity of the Ci-Oi complex in silicon. Phys. Stat. Sol. A, 101, K107. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211010244>.
6. Lavrov, E. V., Hoffmann, L., Nielsen, B. B. (1999). Local vibrational modes of the metastable dicarbon center (C<sub>s</sub>-C<sub>i</sub>) in silicon. Physical Review B, 60, 8081-8086. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.8081>.
7. Vologdin, E. N., Lysenko, A. P. (1998). Integral Radiation Changes in the Parameters of Semiconductor Materials. Moscow, 94.
8. Watkins, G. D., Corbett, J. W. (1961). Defects in Irradiated Silicon. I. Electron Spin Resonance of the Si-A Center. Phys. Rev., 121, 1001-1015. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.121.1001>.
9. Watkins, G.D., Brower, K. L. (1976). EPR Observation of the Isolated Interstitial Carbon Atom in Silicon. Phys. Rev. Lett. 36, 1329. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.1329>.
10. Dolgolenko, A. P. (2013). Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity. Nuclear Physics and Atomic Energy, 14, 377 - 383.
11. Kireev, P. S. (1969). Semiconductor Physics. Moscow: Visshaja Shkola, 590.

**С.В. Лунёв<sup>1</sup>, Ю.А. Удовицкая<sup>1</sup>, Н.В. Хвищун<sup>1</sup>, С.А. Мороз<sup>1</sup>, В.Т. Маслюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Луцкий национальный технический университет, ул. Львовская 75, г. Луцк, 43018, Украина, luniovsr@ukr.net

<sup>2</sup>Институт электронной физики НАН Украины, ул. Университетская 21., г. Ужгород, 88017, Украина, volodymyr.maslyuk@gmail.com

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ДАТЧИКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Установлено на основе измерений инфракрасной Фурье-спектроскопии и эффекта Холла, что основными типами радиационных дефектов в облученных электронами монокристаллах кремния являются кислородсодержащие комплексы, в состав которых входит межузловой углерод и легирующая примесь. Исследуемые монокристаллы кремния в процессе выращивания по методу Чохральского легировались примесью фосфора,*



концентрацією  $N_d=2,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , і в подальшому облучалися при кімнатній температурі потоком електронів  $1 \cdot 10^{17} \text{ ел./см}^2$  з енергією 12 МэВ. Показано, що для таких технологічних умов вирощування і облучення монокристалів кремнія потоком швидких електронів є достатньо ефективним утворення в об'ємі даних монокристалів А-центрів, додатково модифікованих примісью фосфору (комплексів  $VO_iP$ ). Радіаційна обробка досліджуваних монокристалів кремнія дозволила підвищити їх коефіцієнт фоточувствительності при кімнатній температурі більше ніж в 2 рази для довжини хвилі інфрачервоного випромінювання  $\lambda \sim 11,6 \text{ мкм}$ , що відповідає поглиненню радіаційними дефектами, до яких належать комплекси  $C_iO_i$  (міжвузловий вуглерод - кислород). Показано, що при температурах нижче кімнатної з'являється ще одна смуга поглинання при  $\lambda \sim 11,3 \text{ мкм}$ , що відповідає комплексам  $VO_iP$ . Предложена технологія одержання монокристалів кремнія може бути використана для створення на їх основі елементів інфрачервоної техніки для довжин хвиль  $\lambda \sim 11,6 \text{ мкм}$  і  $\lambda \sim 11,3 \text{ мкм}$ , які можуть функціонувати в широкому діапазоні температур.

**Ключові слова:** монокристали кремнія, радіаційні дефекти, фоточувствительність, А-центри, інфрачервона Фур'є-спектроскопія, ефект Холла.

S.V. Luniov<sup>1</sup>, Yu. A. Udovytska<sup>1</sup>, M. V., Khvyshchun<sup>1</sup>, S.A. Moroz<sup>1</sup>, V.T. Maslyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, 75Lvivska Str., Lutsk 43018, Ukraine, luniovser@ukr.net

<sup>2</sup>Institute of electronic physics NAS of Ukraine, 21Universitetska Str., Uzhghorod 88017, Ukraine, volodymyr.maslyuk@gmail.com

#### TECHNOLOGY FOR OBTAINING A SENSITIVE ELEMENT FOR AN INFRARED RADIATION SENSOR

*In this article on the basis of measurements of infrared Fourier spectroscopy and Hall effect has been established that the main types of radiation defects in silicon single crystals, irradiated by the electrons, are oxygen-containing complexes, which include interstitial carbon and alloying impurity. Investigated silicon single crystals were doped in the growth process according to the Czochralski's method by the impurity of phosphorus, concentration  $N_d=2,2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and subsequently irradiated at room temperature by the flow of electrons of  $1 \cdot 10^{17} \text{ el./cm}^2$  with the energy of 12 MeV. It has been shown that for such technological conditions of the growth and irradiation of silicon single crystals by a flow of fast electrons is a very effective the formation in the volume of these single crystals of A-centers, additionally modified by the impurity of phosphorus ( $VO_iP$  complexes). Radiation treatment of the investigated silicon single crystals allowed to increase their photosensitivity coefficient at the room temperature more than 2 times for the wavelength of infrared radiation  $\lambda \sim 11,6 \text{ }\mu\text{m}$ , which corresponds to the absorption by the radiation defects, which belong to the  $C_iO_i$  complexes (interstitial carbon - oxygen). It has been shown that at temperatures lower than the room temperature one more absorption band appears at  $\lambda \sim 11,3 \text{ }\mu\text{m}$ , which corresponds to the  $VO_iP$  complexes. The proposed technology of the obtaining silicon single crystals can be used to create on their basis of the elements of infrared equipment for wavelengths  $\lambda \sim 11,6 \text{ }\mu\text{m}$  and  $\lambda \sim 11,3 \text{ }\mu\text{m}$ , which can be function in a wide range of temperatures.*

**Key words:** silicon single crystals, radiation defects, photosensitivity, A-centers, Fourier infrared spectroscopy, Hall effect.

УДК 621.914.1

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-14>V. Marchuk, S. Hryniuk, I. Marchuk, T.Dzhuhuryan<sup>1</sup>

Lutsk National Technical University

<sup>1</sup>Shetsin Maritime Academy (Poland)

### SIMULATION OF DIMENSIONAL ACCURACY IN AN AUTOMATED GRINDING SYSTEM OF SURFACES OF ROTATION

We consider the impact on the quality of polished surfaces forming their dimensional accuracy in operations grinding roller rings. The process for automated cutting grinding machines can be considered as an inertial link. The total error handling in grinding operations is complex.

**Keywords:** error, roller bearings, grinding, precision, detail

**Formulation.** The quality of the polished surfaces of evaluated a number of factors: the accuracy of the main dimensions, precision geometry details microstructure surface temperature prypalyuvannya defects, cracks, internal stress, and a range of physical and mechanical properties [1]. However, to determine the relationship of a controlled quantity of all the quality indicators is problematic.

Fig. 1 shows the factors affecting the performance as deviations from the set values [2,3].

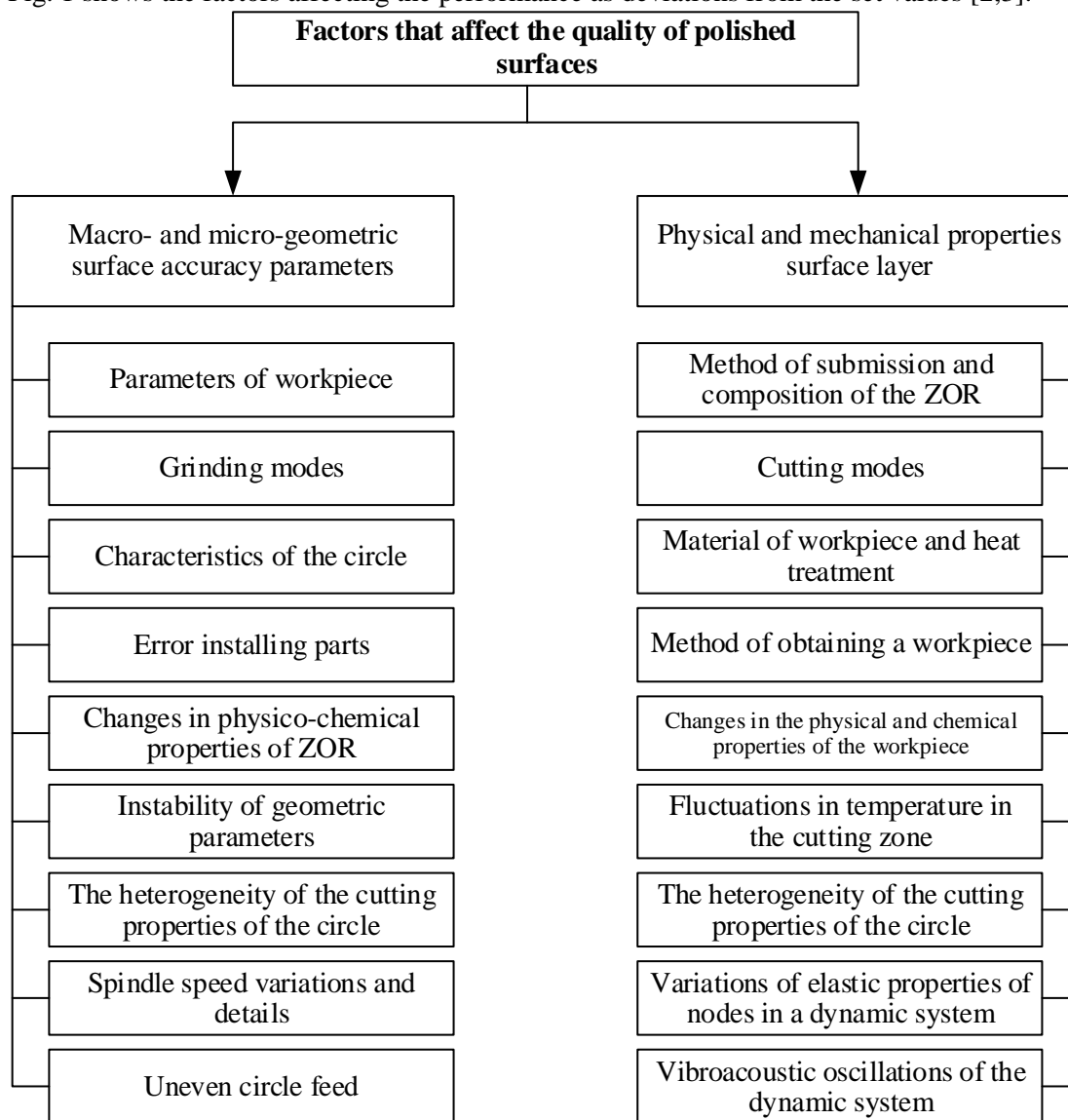


Fig. 1 Factors affecting the quality of grinding surfaces

Identifying process parameters that must be controlled in order to effectively manage this process is a challenging task, depending on the requirements as to accuracy and the nature of relationships between the parameters of the grinding process [4] and indicators of quality of the parts.

Therefore the choice of algorithm and block diagram of the control precision processing generally performed in the following sequence [5]:

1. Establish the causes and size range of dispersion parameters and processing conditions.
2. Development of a mathematical model of grinding process and the process of forming processing errors [7].
3. Analytical study and determine the grinding process control parameters. Formation of requirements to the structure of the cycle, the nature of the procedure to the block diagram and precision process control system.
4. Experimental investigation of the grinding process for the purpose of studying the complex relationships between parameters of technological systems and processing parameters.
5. Development of control algorithm and process control systems for managing its implementation.

**Review and analysis of previous studies.** Analyzing the formation of error handling, the following main components of total error  $\Delta_{\Sigma}$  processing one piece [6]

- error  $\Delta_{II}$  active control system, which is defined as the difference between the actual size parts in the time of the team and given size;
- error  $\Delta_{\theta}$ , caused by temperature deformation of the workpiece;
- $\Delta_c$  error caused the delay time  $t_c$  executive team on the withdrawal of the grinding wheel is determined by:

$$\Delta_c = \int_0^{t_c} v_s(t) dt, \quad (1)$$

where  $v_s$  - speed removal allowance.

To assess the impact of rate changes  $v_{II}$  size controlled by error handling is advisable to allocate a part  $\Delta_{II}$  error  $\Delta_{t_{II}}$  caused by time delays  $t_{II}$  active control system, or in other words, the delay time change measuring signal changes relatively controlled size:

$$\Delta_{t_{II}} = \int_0^t [v_{II}(t) - \frac{1}{i_{\theta}} v_{SUM}(t)] dt, \quad (2)$$

where  $v_{SUM}$  - the rate of change of the measuring signal;

$i_{\theta}$  - the sensitivity of the measurement system.

To determine the analytical errors  $\Delta_{t_{II}}$  and  $\Delta_c$  need to know the patterns of change of speed  $v_s$  removal allowance as a function of time and current handling allowance value  $\Delta D$ . Excluding the impact of the rate of change of temperature deformation of details, we can assume that  $v_s = v_{II}$ .

Analytical study of error  $\Delta_{II}$  fraught with difficulties. In addition, this error does not depend on the selected control algorithm grinding process. Therefore, the theoretical studies of precision processing error  $\Delta_{II}$  taken the same for all processes.

For external grinding thin rings in error  $\Delta_{\Sigma}$  includes another component  $\Delta_F$ , deformations caused by force details.

The numerical value  $\Delta_F$  with minor deviations determined by the equation:

$$\Delta_F(t) = F_y(t) \frac{R_{CK}^3}{4EJ} \left( \frac{4}{\pi} - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi \right), \quad (3)$$

where  $F_y(t)$  - instantaneous value of the radial cutting force;

$R_{CK}$  - average radius of the ring;

$\varphi$  - the angle formed by the line measurement and line of action of the radial cutting force.

**Presenting main material.** Based on the theoretical foundations of automatic control grinding cutting process can be considered as an inertial link [4]. It is assumed that the inertia of a system of elastic grinding machine several orders of magnitude smaller than the inertia of the grinding process, the coefficient cutting grinding wheel  $K_p$  properties within each processing stage of the cycle remains the same width and grinding is also constant. [5] In this case, the variation speed removal allowance can be described following differential equation:

$$T_p \frac{dv_s}{dt} + v_s = K v_{\delta}, \quad (4)$$

where  $v_{\delta}$  - velocity wheelhead (internal grinding - doubled its value);

$K$  - gain, depending on the ratio of the velocity  $v_s / v_{\delta}$  in the steady grinding, ie for  $t > 3T_p$ .

The process mortise grinding bearing rings circle line wear is negligible and, therefore, take  $K = 1$ .

Solving equation (4) with initial conditions  $t = 0$  and  $v_s = v_{sn}$ , we get:

$$v_s = v_{\delta} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) + v_{sn} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (5)$$

Integrating equation (5) for the initial conditions  $t = 0$  and  $S = S_n$ , find an expression for this allowance, which is removed during polishing,

$$S = S_n - v_\delta t + T_p(v_\delta - v_{sn}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right). \quad (6)$$

The equations allow to analyze the change in  $S(t)$  and  $v_s(t)$  at each stage grinding [8]. At the cutting stage and nursing equations describing the laws of removal allowance and rate of removal can be derived from equations (4) and (5) substituting them according  $v_{sn} = 0$  i  $v_\delta = 0$ .

Dependence  $v_s=f(S)$  analytically determined only at the stage of nursing:

$$v_s = v_{sn} - \frac{S_n - S}{T_p}. \quad (7)$$

For the remaining stages of grinding, which  $v_\delta \neq 0$  and dependence  $v_s=f(S)$  is determined by the type of transcendental equation (5) can find the approximate analytical solution of equations and connecting  $v_s$  and  $S$

For this resulted above equation is replaced by an exponential  $e^{-\frac{t}{T}}$  function approximating a member of the species  $\varphi(t) = -at + b$ . The approach is performed by least squares. The most common is an approximation  $\varphi(t)$ , for which the lowest value is:

$$M = \int_{t_1}^{t_2} [f(t) - \varphi(t)]^2 dt. \quad (8)$$

To find the parameters  $a$  and  $b$   $M$  derived from each of the parameters are equal to zero:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial a} = \int_{t_1}^{t_2} [-at^2 + bt - te^{-\frac{t}{T}}] dt = 0; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial b} = \int_{t_1}^{t_2} (-at + b - e^{-\frac{t}{T}}) dt = 0. \quad (10)$$

The equation approximating functions in general written as  $\varphi(t) = -a_1 \frac{t}{T} + (1 - b)$ .

Numerical values  $a_1$  and  $b$  are defined set boundaries approximation interval  $t_1$  and  $t_2$ , which are set based on the largest and smallest processing time at the test stage grinding. It is clear that the narrower interval approximation, the more accurate the resulting equation describes the real dependency [6].

As a result of the approximation equation changes as a function  $v_s$  allowance, for example, during cutting is:

$$v_s = \frac{1}{1-a_1} \left( a_1 \frac{S_n - S}{T_p} + b v_\delta \right). \quad (11)$$

These equations are valid for minor errors of form parts and satisfactorily describe changes in laws  $v_s(t)$  and  $S(t)$  at the finishing stages of grinding. But in the early stages of polishing the change rate largely depends on the nature and source of errors workpiece shape [6].

Research transient cutting internal centreless grinding of details showed that the initial grinding cutting process differs significantly from that described by equation (4). Fig. 2 shows the curve of dynamic error  $\Delta_v$  and  $\Delta_\theta$  temperature error in the function allowance  $Z$ , left on processing the results of analytical studies.

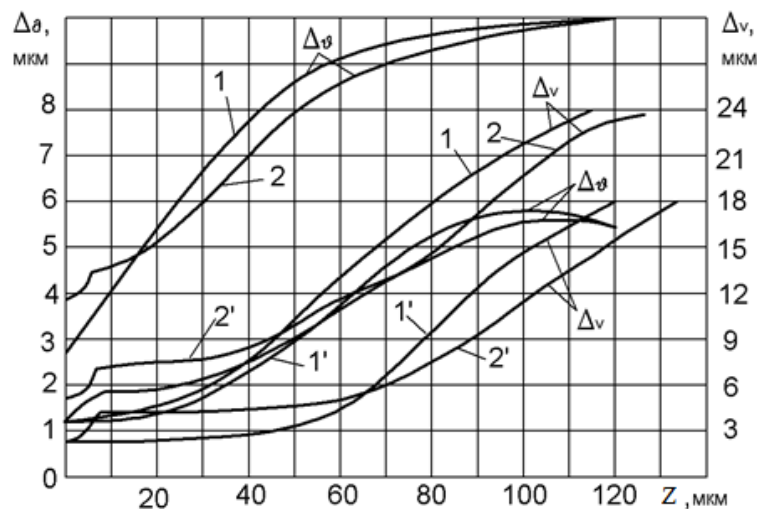


Fig.2. The dependence of temperature and dynamic error of allowance for extreme values of the parameters of the cutting process

In the initial period of grinding allowance is only removal of the treated surface appearances [5]. The time for which the grinding wheel will always be in contact with the workpiece, ie the time *dotorkuvannya* the bottom cavity, defined as:

$$t_{\delta om} = \Delta_{\phi\delta} / v_{\delta}, \tag{12}$$

where  $\Delta_{\phi\delta}$  - output error shape of the workpiece, which is determined, for example, for centreless grinding as the largest riznostinnist details.

For grinding of filing for accelerated  $v_{np}$  time  $t_{\delta om}$  determined from the equation (11)

if  $t_{\delta om} < t_{np}$ ,

where ;  $t_{np} = T_p \ln \frac{v_{np}}{v_{np} - v_s}$  - accelerated while cutting

$v_s$  - the rate of removal allowance for roughing included supply  $v_{\delta}$ .

For  $t_{\delta om} > t_{np}$   $t_{\delta om}$  time is given by:

$$t_{\delta om} = \frac{\Delta_{\phi\delta}}{v_{\delta}} + \left(1 - \frac{v_{np}}{v_{\delta}}\right) \left[ t_{np} - T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{np}}{T_p}}\right) \right]. \tag{13}$$

The error details in the form  $t_{\delta om}$  time, numerically equal to the elastic deformation  $S_{nd}$  technological system to this point:

$$\Delta'_{\phi\delta} = v_{\delta} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\delta om} - t_{np}}{T_p}}\right) + v_{np} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{np}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\delta om} - t_{np}}{T_p}}. \tag{14}$$

and allowance, taken from speeches details during  $t_{\delta om}$  equals  $\Delta_{\phi\delta} - \Delta'_{\phi\delta}$ .

Taking the time  $t_{\delta om}$  origin of the current value of the error form details the difference between the current value of the elastic deformation of the system during grinding and hollow speeches:

$$\Delta_{\phi\delta}(t) = v_{\delta} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\delta om} - t_{np}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}}\right) + v_{np} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{np}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\delta om} - t_{np}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}} - v_{\delta} T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right). \tag{15}$$

After the change:

$$\Delta_{\phi\delta}(t) = \Delta'_{\phi\delta} e^{-\frac{t}{T_p}}. \tag{16}$$

Equation (13) implies that the error  $\Delta_{\phi\delta}$ , if  $T_p$  remains unchanged, only a function of processing time.

If  $t \geq t_{\delta om}$ , the current value of the average speed removal allowance

$$v_s(T_p) = v_{\delta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) - \frac{\Delta'_{\phi\delta}}{T_p} e^{-\frac{t}{T_p}}. \tag{17}$$

**Conclusions.** The total error handling in grinding operations is complex, the main components are:

- own error active control devices that are included in automatic dimensional control;
- errors caused by temperature deformation at all stages of the dimensional parameters;
- errors caused by dynamic processes of the automatic control dimensional parameters.

To increase the accuracy of details dimensional parameters of rolling bearings can be based on optimal construction of the process for grinding vykinchivalnyh processing operations.

Analyzing the calculated data and graphs can be drawn:

- qualitative relationship between the individual components of error processing can vary widely by changing conditions of processing, building cycle time grinding;
- the current value of the random component of the dynamic error  $\Delta_v$  and grinding temperature error  $\Delta_{\theta}$  to vykinchivalnyh stages of processing are determined mainly by instability speed removal allowance, cutting the time constant strain and temperature details at the end of the rough grinding;
- stabilization of allowance removal rate is much faster stabilization of temperature deformations details. Therefore, in some cases the main factor limiting the reduction of time polishing the final stages are temperature error  $\Delta_{\theta}$ ;
- nursing input stage after rough grinding allows you to assign a minimum allowance for fair grinding through removal during most of the nursing bed of fallen and significant reduction of errors in the form of processed holes. For removing minor fluctuations rate allowance at the end of the rough grinding  $\Delta_{v_{sn}}$  and time constant  $\Delta T_p$  entering nursing rough treatment increases productivity. For relatively large values  $\Delta_{v_{sn}}$ ,  $\Delta T_p$  and allowance for nursing  $\Delta D_{\epsilon}$  чорн

significantly increases the speed instability removal allowance and other deformities system VPID late stage grinding. Also increases the scattering of nursing time, time circle to supply parts after the revision;

- Developmental stage after the introduction of fair grinding ceteris paribus increases the supply of the clean and therefore reduce the wheel cart to detail;
- is the most productive cycle of nursing after rough grinding and finish (fourth version);
- for a relatively long time  $t_{уст}$ , removing finishing allowance, the amount of temperature deformation of details at the end of treatment depends mainly on the size of the finishing feed.

Therefore, the limiting factor increasing the supply of clean, along with the factors listed above, may be allowed value of temperature error processing, primarily its systematic component. For relatively small values  $t_{под}$ ,  $t_{уст}$  and editing time, temperature deformation of details at the end of treatment will depend also on their deformation temperature before entering the circle to edit.

### Інформаційні джерела

1. Marchuk V., Hrynjuk S., Hrysjuk I. An analysis of intercommunications of technological factors is with indexes of quality of polishing operations // Technological Complexes. – Lutsk, 2017 - №1(14) – p. 36-43.

2. Марчук В.І. Вплив технологічних чинників на експлуатаційні характеристики роликотідшипників // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом “Інженерна механіка”) Луцького державного технічного університету. 2003. Вип. 12. С. 179-184.

3. Марчук В.І. Про вплив конструктивно-технологічних чинників на параметри якості робочих поверхонь кілець роликотідшипників // Вісник Житомирського державного технологічного університету. 2003. Вип. 2(26). Том II. С. 106-108.

4. Марчук В.І., Михалевич В.Т., Терлецький Т.В. Эффективная система адаптивного управления точностью шлифования // Мир техники технологий. – Харьков, 2003 – №11 – С.50-51.

5. Марчук В.І., Михалевич В.Т. Управление параметрами качества рабочих поверхностей колец конических роликотідшипников // В сб. Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 5-й международной научно-технической конференции. Харьков: ХНПК «ФЭД», 2002. – С. 127-130.

6. Марчук В.І., Михалевич В.Т. Корекція деформаційних похибок при управлінні точністю механічної обробки // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом “Інженерна механіка”). - Луцьк: Луцький державний технічний університет, - 2000. Вип.7. – С. 143-145.

7. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В., Марчук І.В. Моделювання динаміки процесу безцентрового шліфування кілець роликотідшипників. Збірник наукових праць Перспективні технології та прилади, Випуск № 3, Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2013.-С.72-78/

8. Ravenets L., Mechanism of origin of structural vibrations in conical roller bearings / Świć Antoni, Marchuk V.I., Marchuk S.V., Ravenets L.M. // ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH JOURNAL - 2014, nr 23, vol. 8, s. 68-72 [MNiSW: 5].

9. Марчук І.В. Технологічне забезпечення точності шліфування поверхонь обертання підшипників / І.В. Марчук, А.М. Ештеїві, М.В. Олексин / Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямом “Інженерна механіка”). Вип. 57. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 123–127.

**Марчук В.І., Гринюк С.В., Марчук І.В., Джугурян Т.Г.<sup>1</sup>**

Луцький національний технічний університет

<sup>1</sup>Щецінська Морська Академія

### МОДЕЛЮВАННЯ РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

*В роботі розглядається вплив якості шліфованих поверхонь на формування їх розмірної точності на операціях шліфування кілець роликотідшипників. Процес різання шліфуванням на автоматизованих верстатах можна розглядати як інерційну ланку. Сумарна похибка оброблення на шліфувальних операціях має комплексний характер.*

**Ключові слова:** похибка, роликотідшипники, шліфування, точність, деталь.

**Марчук В.И., Гринюк С.В., Марчук И.В., Джугурян Т.Г.<sup>1</sup>**

Луцкий национальный технический университет

<sup>1</sup>Щецинская Морская Академия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ В  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
ВРАЩЕНИЯ**

*В работе рассматривается влияние качества шлифованных поверхностей на формирование их размерной точности на операциях шлифования колец роликоподшипников. Процесс резки шлифовкой на автоматизированных станках можно рассматривать как инерционное звено. Суммарная погрешность обработки на шлифовальных операциях имеет комплексный характер.*

**Ключевые слова:** погрешность, роликоподшипники, шлифовка, точность, деталь.

УДК 621. 315. 592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-15>

Махновець Г.В., м.н.с., Мирончук Г.Л., док.ф.м.н., доц., Піскач Л.В., к.х.н., доц.  
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

### ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ СПЕКТРАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ КРИСТАЛІВ $TlGaSe_2$ , ЛЕГОВАНОГО Cd

*В даній роботі розроблено технологічні умови росту кристалів, досліджено вплив зміни температури в інтервалі  $T=100-300\text{ K}$  на зміну оптичних властивостей, що відбуваються в кристалах  $TlGaSe_2$  та  $TlGaSe_2-CdSe$ , оцінено ширину забороненої зони при прямих та непрямих дозволах переходах, розраховано енергію Урбаха та параметр крутизни.*

**Ключові слова:** коефіцієнт поглинання, ширина забороненої зони, енергія Урбаха, параметр крутизни.

**Постановка проблеми.** Ефективність прогресу в напівпровідниковій техніці пов'язаний з отриманням нових матеріалів і структур. Можливості їх виявлення істотно розширюються при використанні твердих розчинів. В останні десятиліття доволі активно досліджується вплив легування різними домішками (напр. Ag, B, Nd, Er, Tr, Al) кристалів  $TlC^{III}X^{VI}_2$  ( $C = Ga, In; X = S, Se, Te$ ) на специфіку їх фізичних властивостей та особливості фазових переходів [1-5].

$TlGaSe_2$  відноситься до групи шаруватих напівпровідників-сегнетоелектриків типу  $TlC^{III}X^{VI}_2$ , які є привабливими об'єктами для використання в якості функціональних елементів різних електротехнічних пристроїв в сучасній електроніці [6-9]. Шарувата структура призводить до сильної анізотропії ряду характеристик кристалів цих сполук, що обумовлено специфікою їх кристалічної структури [10, 11]. Кристали цієї групи володіють унікальними властивостями: прозорі у широкому спектральному діапазоні, володіють слабкою чутливістю електричних властивостей до введених домішок, низькою рухливістю та концентрацією вільних носіїв заряду. Ця обставина робить самі тернарні сполуки та тверді розчини на їх основі особливо цікавими як з точки зору з'ясування фундаментальних особливостей кристалічної будови шаруватих напівпровідників по мірі ускладнення складу та зміни об'єму елементарної комірки, так і з точки зору їх технічного застосування.

Тому дослідження нових складних шаруватих матеріалів  $TlGaSe_2$  і твердих розчинів на їх основі є одним з актуальних питань напівпровідникового матеріалознавства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**  $TlGaSe_2$  належить до групи шаруватих напівпровідникових сполук типу  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  і характеризуються високою фоточутливістю в видимому діапазоні спектра, великим двопроменезаломленням, широким діапазоном прозорості 0,6-16 мкм. В літературі непряма та пряма ширина забороненої зони кристалів  $TlGaSe_2$  змінюються в широких межах від 1,83 до 2,13 eV та від 2,00 до 2,23 eV [3, 4, 12]. В роботі [3] представлені результати дослідження оптичних властивостей шаруватого кристала  $TlGaSe_2$  в діапазоні довжин хвиль 200-2000 нм. Показано, що довжина хвилі оптичного поглинання в  $TlGaSe_2$  при  $30-150\text{ cm}^{-1}$  підпорядковується правилу Урбаха в діапазоні температур 4,2-293 K.

**Виділення невирішеної проблеми.** Шаруваті сполуки  $TlGaSe_2$  здатні захоплювати молекули домішок в процесі росту кристалів, а також при інтеркаляції [10]. Клас даних сполук практично необмежений, так як існує велика кількість легко дифундованих домішок, які можуть бути введені в різноманітні шаруваті кристали. В процесі легування напівпровідників фізичні властивості залежать від того, яке положення займає легуюча домішка [13]. Поєднання на мікроскопічному рівні різних напівпровідникових шарів може привести до отримання кристалів з новими властивостями [11-14]. В потрійних напівпровідниках питання про шляхи заміщення атомами металів катіонних позицій до кінця не вивчені.

**Результати дослідження.** Монокристали  $TlGaSe_2-CdSe$  вирощували горизонтальним варіантом методу Бріджмена-Стокбаргера.

Зразки товщиною 0,08 – 0,1 мм були отримані шляхом відщеплення вздовж площин спайності. Поверхня мала оптичну якість і ніяких додаткових процедур полірування і травлення не проводилось, внаслідок природних дзеркальних граней розщеплення. Спектри поглинання були зняті в напрямку перпендикулярному шарам за допомогою монохроматора MDR-206 (спектральна роздільна здатність 0,2 нм) в діапазоні довжин хвиль 360–1100 нм з використанням неполяризованого світла.



Кристали були встановлені на холодному тримачі всередині азотного кріостату. Температура зразка змінювалась від 100 до 300 К за допомогою терморегулятора UTREX з точністю  $\pm 0,2$  К.

Одним із найбільш важливих параметрів, що характеризують напівпровідникові властивості, є ширина забороненої зони  $E_g$ . Для отримання інформації про зміну ширини забороненої зони з температурою в роботі проводились оптичні вимірювання в діапазоні температур 100 – 300 К. Коефіцієнти поглинання були отримані з експериментальних даних, використовуючи співвідношення (1) [15]:

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (1)$$

де  $T$  – коефіцієнт пропускання;  
 $\alpha$  – коефіцієнт поглинання ( $\text{см}^{-1}$ );  
 $d$  – товщина зразка (300 мкм);  
 $R$  – коефіцієнт відбивання.

Використовуючи вищезазначене співвідношення коефіцієнт пропускання визначався з вимірювань  $T = I/I_0$ . Коефіцієнти оптичного поглинання були визначені для всіх температур з використанням значення  $R$  ( $R = 0,2605$ ) [16] при кімнатній температурі, вважаючи, що зміна температури від 100 до 300 К приводить до незначної зміни  $R$  [16].

Типові спектри поглинання представлені на рис. 1.

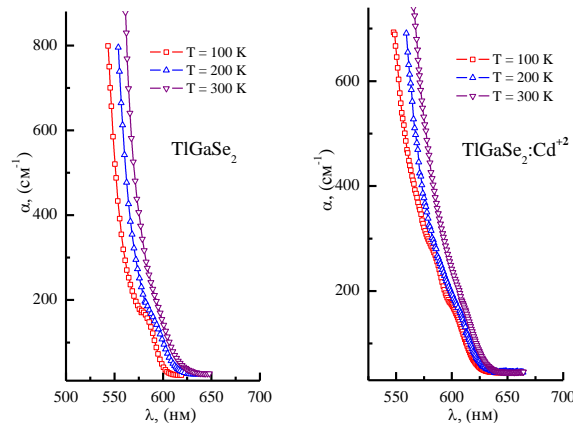


Рис. 1. Спектральний розподіл коефіцієнта поглинання кристалів  $\text{TlGaSe}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2:\text{Cd}^{+2}$

Аналіз експериментальних даних для зразків  $\text{TlGaSe}_2$  та  $\text{TlGaSe}_2:\text{Cd}^{+2}$  дає коефіцієнти поглинання для  $\text{TlGaSe}_2$  і  $\text{TlGaSe}_2:\text{Cd}^{+2}$ , які становлять від 20 до  $850 \text{ см}^{-1}$  і 30 і  $650 \text{ см}^{-1}$  відповідно в температурному діапазоні 100-300 К.

Для отримання детальної інформації про ширину забороненої зони в кристалі, проаналізована залежність коефіцієнта поглинання  $\alpha$  від енергії фотона  $E_g$  за наступним співвідношенням [17]

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^p, \quad (2)$$

де  $A$  – константа, яка залежить від ймовірності переходу;  
 $p$  – індекс, що характеризує оптичний процес поглинання і приймає значення  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $2$  і  $3$  для прямих дозволених (високоенергетична частина спектру), заборонених прямих, непрямих дозволених (низькоенергетична частина спектру) і заборонених непрямих переходів відповідно [17].

Аналіз експериментальних даних проведений за співвідношенням (2) показує, що коефіцієнт поглинання пропорційний  $(h\nu - E_g)^p$  з  $p = 1/2$  та  $p = 2$  (рис. 2). Отримано лінійні залежності для співвідношень  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  від  $h\nu$  та  $(\alpha h\nu)^2$  від  $h\nu$ , що свідчить про реалізацію непрямих та прямих дозволених переходів в досліджуваних кристалах. Оцінка ширини забороненої зони проведена шляхом екстраполяції прямих ліній до  $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$  і  $(\alpha h\nu)^2 = 0$  (рис. 2).

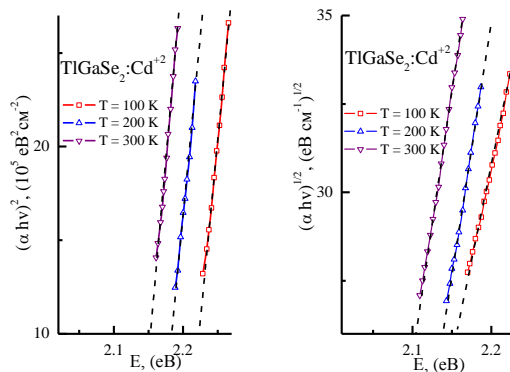


Рис. 2. Спектри поглинання при прямій і непрямій забороненій зоні для  $\text{TI GaSe}_2$ ,  $\text{TI GaSe}_2:\text{Cd}^{+2}$

Температурна зміна величини прямої ( $E_g^d$ ) та непрямой ( $E_g^i$ ) енергетичної щілини представлені в табл. 1 та відкритими точками на рис. 3.

Таблиця 1

Пряма ( $E_g^d$ ) і непрямая ( $E_g^i$ ) заборонені зони при зміні температури

Зразок	T, K	$E_g^d$ , eV	$E_g^i$ , eV	Зразок	T, K	$E_g^d$ , eV	$E_g^i$ , eV
$\text{TI GaSe}_2$	100	2,24	2,07	$\text{TI GaSe}_2:\text{Cd}^{+2}$	100	2,20	2,01
	200	2,20	2,05		200	2,17	1,98
	300	2,17	2,02		300	2,14	1,95

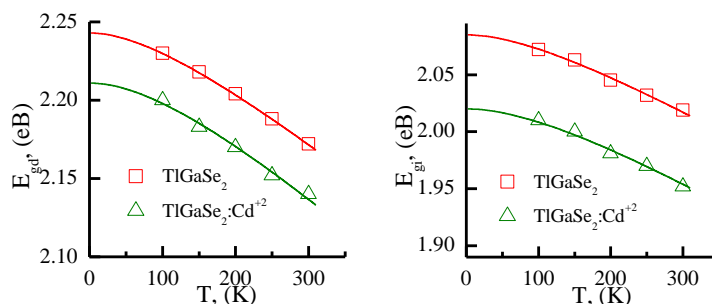


Рис. 3. Температурна залежність для прямої ( $E_g^d$ ) і непрямой ( $E_g^i$ ) забороненої зони

Як видно з рис. 3. легування призводить до незначного зменшення значень як прямої так і непрямой ширини забороненої зони в порівнянні з нелегованим кристалом  $\text{TI GaSe}_2$  [18, 19].

Коефіцієнт поглинання в області енергій нижче краю смуги виражений як експоненціальна функція енергії фотона і підпорядковується наступному виразу [17]:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{E - E_0}{E_U}\right), \quad (3)$$

де  $E$ ,  $E_0$ ,  $E_U$  – енергія фотона, значення ширини забороненої зони при низьких температурах та енергія Урбаха відповідно. З рівняння (3) слідує, що залежність  $\ln(\alpha)$  від енергії поблизу краю поглинання для різних температур може бути представлено прямими, екстраполяції яких сходяться в точці  $(E_0, \alpha_0)$ .  $E_U = k_B T / \sigma(T)$  визначається як обернений логарифмічний нахил коефіцієнта поглинання, а  $\sigma(T)$  називається параметром крутизни.

Лінійна залежність  $\ln(\alpha)$  від  $h\nu$  спостерігалась при усіх досліджуваних температурах в діапазоні 100-300  $\text{cm}^{-1}$ , а всі екстраполяції призводять до кривих збіжності. Точка збіжності кривих відповідає ширині забороненої зони ( $E_{g0}$ ) при  $T = 0$  K.

Для оцінки домінуючих механізмів, які вносять вклад в розмиття краю власного поглинання в роботі проаналізована температурна залежність енергії Урбаха. Результати проведених розрахунків з експериментальних даних за рівнянням 3 представлено в табл. 2 та на

рис. 4 відкритими точками. В температурному діапазоні від 100 до 300 К значення енергії Урбаха змінювалось в межах від 38 до 56 меВ для TlGaSe<sub>2</sub> і від 51 до 67 меВ для TlGaSe<sub>2</sub>:Cd<sup>+2</sup> (табл. 2).

Таблиця 3

Енергія Урбаха та параметр крутизни при різних температурах

Темп. (К)	Зразки			
	TlGaSe <sub>2</sub>		TlGaSe <sub>2</sub> :Cd <sup>+2</sup>	
	$E_U$ (меВ)	$\sigma$	$E_U$ (меВ)	$\sigma$
100	38	0,227	51	0,169
200	47	0,369	59	0,295
300	56	0,462	67	0,386

Як видно, з експериментальних результатів зі зменшенням температури енергія Урбаха зменшується (рис. 4). Вважаємо, що це пов'язано з перезарядкою дефектних центрів під час зниження температури, яка веде до нейтралізації частини заряджених дефектів і зменшення їх впливу на випадкову модуляцію електричного поля в зразку [20].

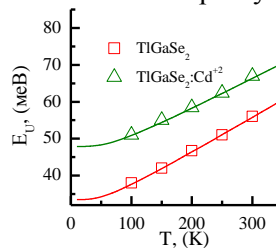


Рис. 4. Залежність енергії Урбаха від температури

Параметр крутизни  $\sigma(T)$  в залежності від температури виражається емпірично наступною залежністю [20]:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \left( \frac{2k_B T}{h\nu_p} \right) \tanh \left( \frac{h\nu_p}{2k_B T} \right), \quad (4)$$

де  $h\nu_p$  відповідає середній енергії фононів, в хвості Урбаха;  $\sigma_0$  – температурно – незалежний, але залежний від матеріалу параметр, обернено пропорційний силі зв'язку між електронами/екситонами і фононами [20, 21].

Таким чином, вивчаючи температурну залежність хвостів Урбаха можна отримати інформацію про взаємодію електронів і/або екситонів з фононами в напівпровідниках.

За нахилами хвостів Урбаха був розрахований залежний від температури параметр крутизни  $\sigma(T)$  (рис. 5 відкриті точки). Щоб отримати оцінку значень енергій фононів, які пов'язані з хвостами Урбаха, експериментальні дані  $\sigma(T)$  були приведені до рівняння 4 з значеннями  $\sigma_0$  і  $h\nu_p$  в якості регульованих параметрів.

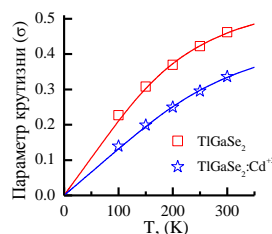


Рис. 5. Залежність параметра крутизни від температури

Суцільна лінія на рис. 5 являє собою кращі результати узгодження експериментальних даних з рівняння 4, при цьому  $\sigma_0 = 0,58; 0,53$ ,  $h\nu_p = 47; 59 \pm 1,0$  меВ для TlGaSe<sub>2</sub> та TlGaSe<sub>2</sub>:Cd<sup>+2</sup> відповідно. Розрахована з отриманих даних сила електрон фононної взаємодії ( $g = 2/3 \sigma_0^{-1}$ ) [22, 23] становить 1,15; 1,24; для TlGaSe<sub>2</sub> та TlGaSe<sub>2</sub>:Cd<sup>+2</sup> відповідно. Це значення є типовими для кристалів, які мають дефекти нестехіометрії в катіонних підрешітках. Збільшення  $g$  в

порівнянні з  $\text{TlGaSe}_2$  можна пов'язати із введенням атомів Cd в кристал  $\text{TlGaSe}_2$ , оскільки вони, як заряджена домішка впливають на електрон/екситон-фононну взаємодію.

**Висновки.** Проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання в діапазоні температур 100-300 К. Оцінено ширину забороненої зони при прямих та непрямих дозволених переходах. Встановлено, що легування  $\text{Cd}^{+2}$  призводить до незначного зменшення значень як прямої так і непрямой ширини забороненої зони в порівнянні з нелегованим кристалом  $\text{TlGaSe}_2$ . Проведена оцінка домінуючих механізмів, які вносять вклад в розмиття смуги краю власного поглинання. Встановлено, що енергія фононів  $h\nu_p$ , яка є вищою ніж найвища оптична мода кристалів  $\text{TlGaSe}_2$  пов'язана з структурними та композиційними розладами.

#### Інформаційні джерела

1. Panich A. M., Kashida S. Single-crystal NMR for the layered semiconductor  $\text{TlGaSe}_2$  // J. of Physics: Condensed Matter, 2008. Vol. 20. P. 3–31.
2. Senturk E. [et al.]. Incommensurate phase properties of  $\text{TlGaSe}_2$  layered crystals // Crystal Research and Technology, 2005. Vol. 40, iss. 3. P. 248–252.
3. B. Abay, H.S. Guder, H. Efeoglu, Y.K. Yogurtcu Journal of Physics and Chemistry of Solids 62 (2001) 747-752.
4. Mikailov F. A. [et al.]. Phase Transactions and Metastable States in  $\text{TlGaSe}_2$  // Phase Transactions, 2003. Vol. 76. P. 1057–1064.
5. Abdullayev N. A., Mammadov T. G., Suleymanov R. A. Negative thermal expansion in the layered semiconductor  $\text{TlGaSe}_2$  // Physica Status Solidi (B), 2005. Vol. 242. P. 983–989.
6. Сеидов Х. Ю., Сулейманов Р. А. Аномалии электрофизических, тепловых и упругих свойств слоистых полупроводников-сегнетоэлектриков  $\text{TlGaSe}_2$ : нестабильность электронной подсистемы // Физика твердого тела, 2008. Т. 50. С. 1169–1176.
7. Dawood S. A. [et al.]. Structure and electrical properties of doped  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlInS}_2$  single crystals // Azerbaijan J. of Physics. Fizika, 2011. Vol. 17. P. 27–30.
8. Dawood S. A. [et al.]. Admittance and permittivity in doped layered  $\text{TlGaSe}_2$  single crystals // Acta Physica Polonica (A), 2014. Vol. 125, № 6. P. 1267–1271.
9. Мамедов Т. Г., Сулейманов Р. А. Влияние деформации решетки и фазовых переходов на электронные спектры слоистых полупроводников  $\text{TlGaS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  // Физика твердого тела, 2003. 45 (12). С. 2141–2146.
10. Боровой Н. А., Гололобов Ю. П., Исаенко Г. Л., Степанищев Н. Б. Влияние политипии на структурные фазовые превращения в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  // Физика твердого тела, 2009. 51 (11). С. 2229.
11. Мамедов Г. А., Годжаев Э. М., Магеррамов А. М., Зейналов Ш. А. Исследование рельефа поверхности атомно-силовым методом и диэлектрических свойств композиций полиэтилена высокой плотности и добавок  $\text{TlGaSe}_2$ . // Электронная обработка материалов, 2011. 47(6). С. 94–98.
12. Годжаев Э. М., Магеррамов А. М., Зейналов Ш. А., Османова С. С., Аллахьяров Э. А. Короноелектреты на основе композитов полиэтилен высокой плотности с полупроводниковым наполнителем  $\text{TlGaSe}_2$ . // Электронная обработка материалов, 2010. 46(6). С. 91–96.
13. Godzhaev E. M., Allakhyarov E. A., Khalilova Kh. S., Suleimanova A. M. Transport Properties of  $\text{TlInSe}_2$  {Ln} (Ln = Eu, Sm, Yb) // Inorg. Mater, 2003. 39 (7). P. 676–679.
14. Кітик І. В., Мирончук Г. Л., Замуруєва О. В., Парасюк О. В., Свідзинський А. В. Фотоелектричні дослідження твердого розчину  $\text{TlInSe}_2\text{-Si(Ge)Se}_2$  ( $x=0,1; 0,2$ ) // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі України. Сер. Фіз. науки., 2015. 10 (311). С. 17–21.
15. Сардарлы Р. М., Самедов О. А., Садыхов И. Ш., Алиев В. А. Релаксорные свойства  $\text{TlInS}_2$ , легированного Fe // Физика твердого тела, 2003. 45 (6). С. 1067–1069.
16. Phase diagram and specific band gap features of novel  $\text{TlGaSe}_2\text{: Zn}^{+2}(\text{Cd}^{+2}, \text{Hg}^{+2})$  crystals / G. Makhnovets, Ph.D.; Galyna Myronchuk, Ph.D.; L. Piskach, Ph.D.; Oleg Parasyuk, Professor; Iwan Kityk // Journal: Journal of Alloys and Compounds, Volume 768, 2018, Pages 667-675.
17. Кітик І. В., Мирончук Г. Л., Замуруєва О. В., Парасюк О. В., Шаварова Г. П. Температурна залежність питомої електропровідності монокристалів  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  ( $x = 0,1; 0,2$ ) вдовж та перпендикулярно до шарів // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі України. Сер. Фіз. Науки, 2015. 10 (311). С.13–17.
18. Мустафаева С. Н., Алиев В. А., Асадов М. М. Прыжковая проводимость на постоянном токе в монокристаллах  $\text{TlGaS}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  // Физика твердого тела, 1998. 40 (4). С. 612–615.

19. Abdinbekov S. S., Guseinov G. D. Physico-Chemical Investigation of  $\text{TlInSe}_2\text{-TlGaTe}_2$  // Bulletin de la Societe Chimique de France, 1986. (3). P. 355–357.
20. Haniyas M, Anagnostopoulos A, Kambas K and Spyridelis J 1989 J. Physica B 160 154.
21. Махновець Г. В., Мирончук Г. Л., Парасюк О. В. Оптичні властивості кристалів системи  $\text{Tl}_{1-x}\text{Ga}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$  ( $x=0,05; 0,1$ ) // Науковий вісник Чернівецького університету: Зб. наук. праць. – Вип. 781.: Хімія. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. №781. С. 75-80.
22. Study of optical absorption in  $\text{TlGaSe}_2\text{:Zn}^{2+}$  single crystals / Makhnovets G.V., Myronchuk G.L., Piskach L.V., Vidrynskyi B. V., Kevshyn A.H. // Ukrainian Journal of Physical Optics. Volume 19, Issue 1, 2018, Pages 49-59.
23. Шелег А. У., Иодковская К. В., Курилович Н. Ф. Влияние gamma-облучения на диэлектрическую проницаемость и электропроводность кристаллов  $\text{TlGaS}_2$  // Физика твердого тела, 2003. 45 (1). С. 68–70.

**Махновець А.В.**, м.н.с., **Мирончук Г.Л.**, док.ф.м.н., доц., **Пискач Л.В.**, к.х.н., доц.  
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинский

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{TlGaSe}_2$ , ЛЕГИРОВАННОГО Cd

В данной работе разработаны технологические условия роста кристаллов, исследовано влияние изменения температуры в интервале  $T = 100\text{-}300$  К на смену оптических свойств, происходящих в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlGaSe}_2\text{-CdSe}$ , оценено ширину запрещенной зоны при прямых и косвенных разрешенных переходах, рассчитана энергия Урбаха и параметр крутизны.

**Ключевые слова:** коэффициент поглощения, ширина запрещенной зоны, энергия Урбаха, параметр крутизны.

**Makhnovets H.V., Myronchuk G.L., Piskach L.V.**  
Lesya Ukrainka Eastern European National University

### FEATURES OF CHANGE OF THE SPECTRAL DISTRIBUTION OF THE ABSORPTION COEFFICIENT OF $\text{TlGaSe}_2$ CRYSTALS DOPED BY Cd

In this paper, the technological conditions of crystal growth have been developed, the influence of temperature changes in the range  $T = 100\text{-}300$  K on the change of optical properties occurring in  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlGaSe}_2\text{-CdSe}$  crystals has been studied, the width of the band gap in the direct and indirect permissible transitions is estimated, Urbach energy is calculated and the steepness parameter.

**Keywords:** absorption coefficient, width of the band gap, Urbach energy, steepness parameter.

УДК 621. 315. 592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-16>

Мирончук Д.Б., студент., Кот Ю.О., студент, Мирончук Г.Л. к.ф.м.н., доц., Замуруєва О.В., к.ф.-м.н.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

### ВПЛИВ РОЗМІРІВ ЗЕРЕН КРИСТАЛІЧНОГО ПОРОШКУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ГЕНЕРАЦІЇ ДРУГОЇ ГАРМОНІКИ

*У даній роботі проведено аналіз впливу ширини забороненої зони та середніх розмірів зерен на інтенсивність генерації другої гармоніки кристалів  $\text{AgGaGeS}_4$  та  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Отриманий результат свідчить про те, що багатокомпонентні халькогеніди, а саме  $\text{AgGaGeS}_4$  та  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ , є перспективними нелінійно-оптичними матеріалами, оскільки в них поріг лазерного пошкодження є більшим, а нелінійно-оптичний відгук порівняний із комерційно використовуваними  $\text{AgGaS}_2$  та  $\text{AgGaSe}_2$ .*

**Ключові слова:** нелінійна оптика, лазер, генерація третьої гармоніки.

**Постановка проблеми.** Перетворення частоти ІЧ лазерних джерел (частотна модуляція) є одним з основних завдань оптоелектронної техніки, яку використовують у цивільній і військових галузях, охоплюючи атмосферний моніторинг, лазерний радар та ін. Явище генерації другої гармоніки в кристалічних порошках вперше спостерігали в 1968р. Рез з співробітниками [1], а потім детально досліджували Грая [2] і Куртц та Перрі [3]. Цей метод полягає в наступному. Кристали, які мають напрям фазового синхронізму, проявляють лінійну залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від середніх розмірів зерен, якщо ці розміри менші когерентної довжини. В більш крупних зернах інтенсивність генерації другої гармоніки не залежить від їх розмірів. Грая використовував цей метод для оцінки когерентної довжини. В кристалах, які не мають напрямку фазового синхронізму, інтенсивність генерації другої гармоніки не залежить від розміру зерен. За нахилом прямої, яка апроксимує залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від діаметра зерен можна розрахувати середнє значення елементів тензора нелінійної сприйнятливості [3]. Існує також можливість визначення кута анізотропії кристалу [2] і пов'язаного з ним ширини головного максимуму в кутовому розподілі інтенсивності ГДГ. Куртц і Перрі [3] запропонували застосовувати порошковий метод для класифікації нелінійних кристалів, які використовуються в лазерній оптиці. Нині цей метод інтенсивно використовується для вивчення нелінійно-оптичних властивостей нових матеріалів [4-6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Із 1970-х років у якості нелінійно-оптичних матеріалів практично використовуються  $\text{AgGaQ}_2$  ( $Q = \text{S}, \text{Se}$ ) [7] та  $\text{ZnGeP}_2$  [8]. Проте всім цим кристалам властиві ті чи ті серйозні недоліки. Наприклад, кристали  $\text{AgGaQ}_2$  ( $Q = \text{S}, \text{Se}$ ) мають низький поріг лазерного пошкодження, а  $\text{ZnGeP}_2$  демонструє сильне двофотонне поглинання звичайного 1 мкм (Nd: YAG) або 1,55 мкм (Yb: YAG) джерела лазерного накачування. Тому пошук нових НЛО матеріалів є актуальним і останнім часом дуже активним [4-6]. Серед усіх вимог, що ставлять до нових ІЧ нелінійно-оптичних матеріалів, одними з найвагоміших є збільшення порогу лазерного пошкодження (стійкості) та уникнення двофотонного поглинання.

**Виділення невирішеної проблеми.** Збільшення променевої стійкості в нелінійних кристалах зазвичай пов'язують зі збільшенням ширини забороненої зони сполук. Останнім часом багато досліджень зосереджені на включенні в ІЧ НЛО кристали нелінійно-оптичних активних одиниць, а саме тетраедрів  $(\text{Ga/Ge})\text{Q}_4$  ( $Q = \text{S}, \text{Se}$ ), що містять халькогени [9]. Введення лужних або лужноземельних металів дозволяє збільшити ширину забороненої зони, а щільне розташування мікроскопічних НЛО активних блоків збільшує можливість досягнення великої макроскопічної нелінійно-оптичної відповіді.

**Результати дослідження.** Вимірювання проводили за допомогою установки, представленої на рис. 1. У досліді використовували Nd:YAG наносекундний імпульсний лазер з довжиною хвилі 1064 нм як джерело фундаментального випромінювання. Значення енергії плавно змінювали поляризатором Глана. Значення падаючого фундаментального випромінювання вимірювали за допомогою германієвого детектора, а його другу гармоніку – за допомогою фотопомножувача з встановленим інтерференційним фільтром, що пропускає електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі 532 нм (друга гармоніка).

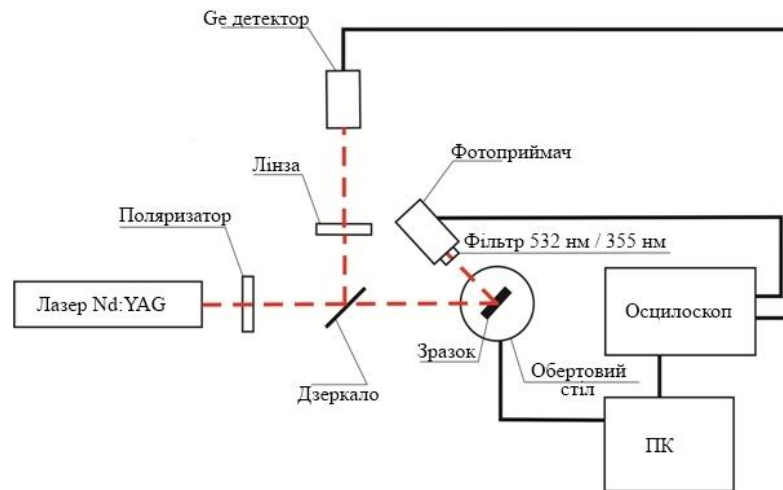


Рис.1. Вимірювальна система для визначення інтенсивності сигналу другої або третьої гармоніки залежно від застосовуваних фільтрів в результаті опромінення лазерним світлом з довжиною хвилі 1064 нм

Зразки поміщали на оборотний стіл у спеціальний тримач. Рівні інтенсивності отриманих сигналів основного випромінювання і його другої гармоніки зчитували за допомогою осцилографа Tektronix із частотою 1 ГГц. Таким чином фіксувалась залежність генерації гармонік від інтенсивності фундаментального сигналу.

Вимірювання ГДГ виконували за допомогою методики порошку Куртца-Перрі [3]. Потрібно зазначити, що метод Куртца-Перрі дозволяє давати лише відносну оцінку ефективності нелінійно-оптичних перетворень, використовуючи лише порошок нелінійно-оптичного кристалу. Цей метод дає можливість досліджувати нові перспективні НЛО матеріали, проте в ньому використовуємо наступні наближення – частинки порошку вважаються монокристалами з близькими розмірами до 100 мкм, які хаотично орієнтовані в просторі. Водночас кристаліти рівномірно розподілені між пластинками. Розмір зерен у порошку, що отримані внаслідок механічного дроблення, оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа. Вони становили 30-100 мкм. Результати вимірювання ГДГ для досліджуваних зразків представлені на рис.2.

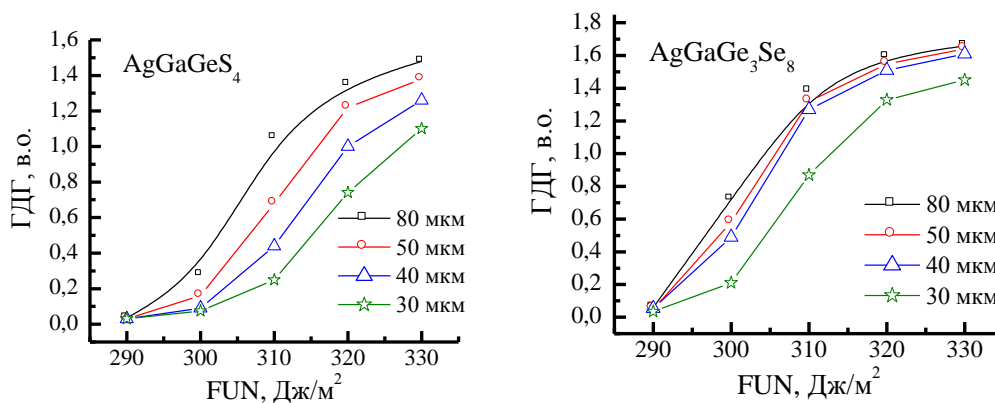


Рис.2. Залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від густини енергії падаючого фундаментального пучка.

Результати досліджень ГДГ у кристалі  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  показують, що нелінійно-оптичний коефіцієнт виміряний методом Куртца-Перрі становить 29,3 пм/В, що є дуже близьким до  $d_{36}$   $\text{AgGaSe}_2$  (30 пм/В) [10]. Отриманий результат добре узгоджений з даними роботи [11], у яких зазначено, що коефіцієнт  $d_{31}$  для сполуки  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  становить ~29 пм/В. Значення  $d_{36}$  для  $\text{AgGaS}_2$  у наукових роботах змінюється майже в три рази [12], що пояснюється проявом неконтрольованої дефектності. Вперше оцінена оптична нелінійність другого порядку для  $\text{AgGaGeS}_4$  становить 5,79 пм/В.

Згідно проведених експериментів та аналізу отриманих результатів видно, що інтенсивність ГДГ збільшується зі зменшенням ширини забороненої зони як для  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  (2,2eВ) так і для  $\text{AgGaGeS}_4$  (2,8eВ), що є характерним для багатокомпонентних халькогенідних кристалів (Рис.3).

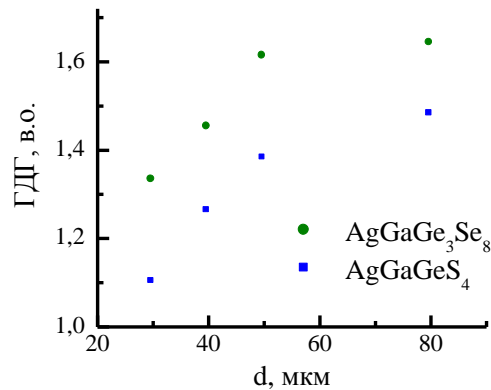


Рис.3. Залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від середніх розмірів зерен кристалічного порошку

Ширина забороненої зони як для сульфідів, так і для селенідів є більшою, ніж для еталонних  $\text{AgGaS}_2$  (2,64 eВ) та  $\text{AgGaSe}_2$  (1,8 eВ). Через збільшення ширини забороненої зони ці сполуки можуть мати більші пороги лазерного пошкодження в порівнянні з еталонними. Разом із тим інтенсивність сигналу ГДГ для обох сульфідів порівняна з  $\text{AgGaS}_2$ , а селенідів з  $\text{AgGaSe}_2$ , що і визначає перспективність використання цих сполук.

**Висновки.** Отриманий результат свідчить про те, що багатокомпонентні халькогеніди, а саме  $\text{AgGaGeS}_4$  та  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ , є перспективними нелінійно-оптичними матеріалами, оскільки в них поріг лазерного пошкодження є більшим, а нелінійно-оптичний відгук порівняний із комерційно використовуваними  $\text{AgGaS}_2$  та  $\text{AgGaSe}_2$ .

Досягнуті параметри нелінійно-оптичних ефектів другого порядку, отриманих для довжин хвиль, відповідних освітленню ПЧ лазером, дає змогу прогнозувати широке застосування досліджуваних кристалів як матеріалів для нелінійно-оптичного перетворення ПЧ лазерних променів, що має вирішальне значення для ПЧ лідарних систем (світлові далекоміри). Потрібно зазначити, що впродовж кількакратної ПЧ-індукованої обробки, спостережувані фотоіндуковані зміни були повністю зворотними, що підтверджує їхній високий потенціал відтворення.

#### Інформаційні джерела

1. Филимонов А.А., Суров В., Рез И.С. – ЖЭЕФ, 56, 1519 (1969)
2. Graja A., Phys.stat.sol., 27. 93 (1968): Acta.Phys.Polon., 26, 283 (1969)
3. Kurtz S. K., Perry T. T. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials. J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 3798–3813.
4. Isaenko L. I., Yelisseyev A. P. Recent studies of nonlinear chalcogenide crystals for the mid-IR. Semicond. Sci. Technol. 2016. Vol. 31. P. 123001 (24pp).
5. Kui Wu, Shilie Pan. A review on structure-performance relationship toward the optimal design of infrared nonlinear optical materials with balanced performances / Coord. Chem. Rev. 2018. Vol. 377. P 191–208.
6. Fei Liang, Lei Kang, Zheshuai Lin, and Yicheng Wu. Mid-infrared nonlinear optical materials based on metal chalcogenides: structure-property relationship. Cryst. Growth Des. 2017. Vol. 17, № 4. P. 2254–2289.
7. Silver thiogallate, a new material with potential for infrared devices / D. S. Chemla, P. J. Kupecek, D. S. Robertson, R. C. Smith. Opt. Commun. 1971. Vol. 3. P. 29–31.
8. Boyd G. D., Buehler E., Storz F. G. Linear and nonlinear optical properties of  $\text{ZnGeP}_2$  and  $\text{CdSe}$ . Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 301–304.
9. Mechanism of linear and nonlinear optical effects of chalcopyrite  $\text{AgGaX}_2$  (X=S, Se, and Te) crystals / L. Bai, Z. Lin, Z. Wang, C. Chen, M. H. Lee. J. Chem. Phys. 2004. Vol. 120. P. 8772–8778.



10. Orthorhombic nonlinear crystals of  $\text{Ag}_x\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_2$  for the mid-infrared spectral range / Valeriy Badikov, Konstantin Mitin, Frank Noack, Vladimir Panyutin, Valentin Petrov, Alexander Seryogin, Galina Shevyrdyaeva. Opt. Mater. 2009 Vol. 31, № 4. P. 590–597.

11. Orthorhombic nonlinear crystals of  $\text{Ag}_x\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_2$  for the mid-infrared spectral range / V. Badikov, K. Mitin, F. Noack, V. Panyutin, V. Petrov, A. Seryogin and G. Shevyrdyaeva. Opt. Mater. 2009. Vol. 31, № 4. P. 590–597.

12. Nonlinear optical crystals: A complete survey / ed. D. N. Nikogosyan. New York: Springer, 2005.

**Мирончук Д.Б.**, студент., **Кот Ю.О.**, студент, **Мирончук Г.Л.** к.ф.м.н., доц., **Замуруєва О.В.** к.ф.-м.н., ст.викл.

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

#### **ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

*В данной работе проведен анализ влияния ширины запрещенной зоны и средних размеров зерен на интенсивность генерации второй гармоники кристаллов  $\text{AgGaGeS}_4$  и  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Полученный результат свидетельствует о том, что многокомпонентные халькогениды, а именно  $\text{AgGaGeS}_4$  и  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ , являются перспективными нелинейно-оптическими материалами, поскольку в них порог лазерного повреждения является большим, а нелинейно-оптический отклик сравним с коммерчески используемыми  $\text{AgGaS}_2$  и  $\text{AgGaSe}_2$ .*

**Ключевые слова:** нелинейная оптика, лазер, генерация третьей гармоники.

**Myronchuk D. B.**, student., **Kot Yu.O.**, student, **Myronchuk, G.L.** Ph.D., Assoc. **Zamurujeva O.V.** Cand. Sc. (Phys.-Math.)

Lesya Ukrainka Eastern European National University

#### **INFLUENCE OF THE SIZE OF CRYSTALLINE POWDER GRAINS ON THE INTENSITY OF GENERATION OF SECOND HARMONICS**

*In this paper, we analyzed the influence of the band gap and the average grain size on the intensity of generation of the second harmonic of  $\text{AgGaGeS}_4$  and  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  crystals. The result suggests that multicomponent chalcogenides, namely  $\text{AgGaGeS}_4$  and  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ , are promising nonlinear-optical materials, since the laser damage threshold is large and the nonlinear-optical response is comparable to the commercially used  $\text{AgGaS}_2$  and  $\text{AgGaSe}_2$ .*

**Keywords:** nonlinear optics, laser, third harmonic generation

УДК 681.51

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-17>Мороз С.А. к.т.н., Пташенчук В.В. к.т.н., Приступа С.О. к.т.н., Кайдик О.Л. к.т.н.  
Луцький національний технічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ РУХОВОЇ АКТИВНОСТІ ЛЮДИНИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БІОСИГНАЛІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БІОЕЛЕКТРИЧНИМ ПРОТЕЗОМ

*В статті проведено аналіз рухової діяльності людини. Встановлено, що управління скорочувальною активністю м'язової клітини здійснюється за допомогою мотонейронів - нервових клітин, тіла яких лежать в спинному мозку, а довгі відгалуження - аксони в складі рухового нерва підходять до м'язів, Біоелектричний вплив, переданий від центральної нервової системи до м'язів, відбивається підвищенням амплітуди в так званих рухових точках - місцях найбільшого скупчення рухомих одиниць. Якщо знімати біопотенціал в місцях розташування рухових точок, то ми можемо отримати вихідні сигнали для управління протезом. Електроміографією є основним методом дослідження нервово-м'язової системи за допомогою ресстрації біоелектричних потенціалів. Електро-міографічні дослідження показують, що амплітуди біопотенціалів варіюються від 5-10 мкВ (м'яз в стані спокою) до 500-1000 мкВ (м'яз в збудженому стані). Основний діапазон частот біопотенціалів, що ресструються поверхневими електродами, становить 20-200 Гц, з максимумом близьким 50 - 100 Гц. Запропоновано структурну схему управління біоелектричним протезом кисті.*

**Ключові слова:** рухова діяльність, біопотенціал, біоелектричний протез.

У формуванні рухів людини беруть участь всі рівні нервової системи (спинний мозок, різні утворення головного мозку, периферичні нерви, а також опорно-руховий апарат (ОРА) - безпосередній виконавець рухів. Кістки і суглоби беруть участь в рухах пасивно, підкоряючись дії м'язів, але грають провідну роль в здійсненні опорної функції. Певна форма і будова кісток надають їм більшу міцність, запас якої на стиск, розтяг, вигин значно перевищує навантаження, можливі при повсякденній роботі ОРА. Рух проявляється у вигляді зміни положення суглоба (або суглобів) під впливом скорочення скелетних м'язів, які служать як би двигунами для кожного суглоба, або здійснюються без участі кістково-суглобового апарату одними м'язами. Скелетні м'язи здійснюють як статичну діяльність, фіксуючи тіло в певному положенні, так і динамічну, забезпечуючи переміщення тіла в просторі, окремих його частин відносно один одного. Обидва види м'язової діяльності тісно взаємодіють, доповнюючи один одного: статична діяльність забезпечує вихідний фон для динамічної. Як правило, положення суглоба змінюється за допомогою декількох м'язів різноспрямованої, у тому числі протилежної дії.

Складні рухи суглоба наповнюються узгодженим, одночасним або послідовним скороченням м'язів. Узгодженість (координація) особливо необхідна для виконання рухових актів, в яких беруть участь багато суглобів (наприклад, ходьба, біг, плавання тощо).

У світлі сучасних уявлень про механізми координації рухів, м'язи - не тільки виконавчий руховий апарат, а й своєрідний орган почуттів. В м'язових волокнах і сухожиллях є спеціальні нервові закінчення - рецептори, які посилають імпульси до клітин різних рівнів ЦНС. В результаті між нею і м'язами створюється замкнутий цикл: імпульси від різних утворень ЦНС, що йдуть по рухових нервах, викликають скорочення м'язів, а імпульси, що посилаються рецепторами м'язів, інформують ЦНС про кожен елемент і моменти рухів. Циклічна система зв'язків забезпечує точне управління рухами і їх координацію [1]. Хоча в управлінні рухами скелетних м'язів при здійсненні рухових актів беруть участь різні відділи ЦНС, провідна роль в забезпеченні їх взаємодії і постановці мети рухової реакції належить корі великих півкуль головного мозку, особливо при здійсненні складних рухів. У корі великих півкуль рухова і чутлива зони утворюють єдину систему, при цьому кожній м'язової групі відповідає певна ділянка цих зон. Подібний взаємозв'язок дозволяє точно виконувати рухи, співвідносячи їх з діючими на організм факторами навколишнього середовища.

Управління скорочувальною активністю м'язової клітини здійснюється за допомогою мотонейронів - нервових клітин, тіла яких лежать в спинному мозку, а довгі відгалуження - аксони в складі рухового нерва підходять до м'язів (рис. 1). Увійшовши в м'яз, аксон розгалужується на безліч гілочок, кожна з яких підведена до окремого волокна. Таким чином, один мотонейрон управляє цілою групою волокон (так звана нейромоторна одиниця), яка працює як єдине ціле. Комплекс з мотонейроном і іннервуваними м'язовими волокнами

називають руховою одиницею (РО). Середнє число волокон, які іннервують один мотонейрон, характеризує величину РО м'яза, а зворотну величину називають щільністю іннервації. Остання є великою в тих м'язах, де рух невеликий і «тонкий» (очі, пальці, мова). Мале її значення буде, навпаки, в м'язах з «грубими» рухами (наприклад, тулуб).

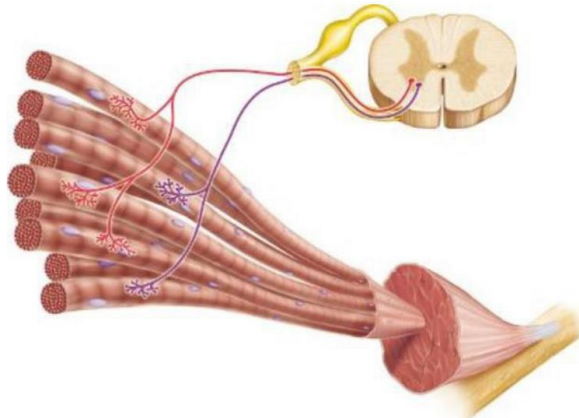


Рис. 1. Процес управління скорочувальною діяльністю м'язів

М'яз являє собою структурний елемент локомоторної системи з множинними зворотними зв'язками. У нервовій регуляції м'язової діяльності беруть участь мінімум три підсистеми. Перша підсистема визначає скоротливу функцію мускулатури. Вона складається з мотонейронів і м'язів з розташованими в них пропріорецепторами. Імпульсна інформація в ній поширюється від клітин передніх рогів спинного мозку до м'язів і від м'язових рецепторів в зворотному напрямку через задньокорінцеву систему до спинномозкового центру і знову до мотонейронів. Друга підсистема забезпечує оптимальний рівень збудливості пропріорецепторів. Третя підсистема, що складається з аксони колатералей мотонейронів і вставних нейронів Реншоу, призначена для саморегуляції мотонейронів [1].

Завдання і мета рухової дії формуються мисленням, що визначає спрямованість уваги і зусиль людини. До недавнього часу протези прикріплялися до людського тіла механічно і не мали ніякого зв'язку з нервовою системою. Вони могли згинатися в своїх залізних шарнірах-суглобах, але для виконання кожного руху власнику потрібно було тим або іншим чином регулювати поведінку свого протеза вручну, забезпечуючи зворотний зв'язок. Коли людині без кінцівки хочеться поворухнути пальцем, мозок генерує відповідний сигнал, який йде по нервах, що веде до м'язів кінцівки. Але, оскільки кінцівка відсутня, сигнал йде «в порожнечу». Але якщо по шляху «перехопити» нервові імпульси, то на цій основі після аналізу і обробки даних можна сформулювати команди для управління протезом.

Біоелектричний вплив, переданий від центральної нервової системи до м'язів, відбивається підвищенням амплітуди в так званих рухових точках - місцях найбільшого скупчення РО. Область рухової точки є максимально збудливою ділянкою м'язу. Якщо знімати біопотенціал в місцях розташування рухових точок, то ми можемо отримати вихідні сигнали для управління протезом. Метод дослідження нервово-м'язової системи за допомогою реєстрації біоелектричних потенціалів в медицині прийнято називати електроміографією (ЕМГ). На рис. 2 приведена ЕМГ при збудженні м'язу.

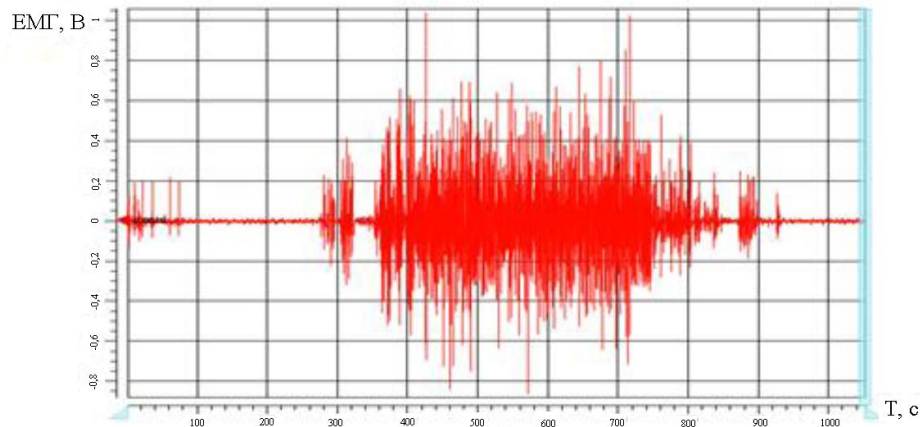


Рис. 2. ЕМГ при збудженні м'язу

ЕМГ дослідження показують, що амплітуди біопотенціалів варіюються від 5-10 мкВ (м'яз в стані спокою) до 500-1000 мкВ (м'яз в збудженому стані). Основний діапазон частот біопотенціалів, що реєструються поверхневими електродами, становить 20 - 200 Гц, з максимумом близьким 50 - 100 Гц [1].

Розрізняють поверхневу ЕМГ і голчасту ЕМГ (рис. 3) Поверхнева (глобальна, нашкірна, або сумарна ЕМГ) - це метод реєстрації та вивчення біопотенціалів м'язів у спокої і при їх активації шляхом відведення біоелектричної активності поверхневими електродами нашкірно над руховою точкою м'яза. Цей метод є неінвазивним і безболісним і дозволяє оцінювати електричну активність м'язів глобально, тобто сумарно [1, 2].

Голчаста (або локальна ЕМГ) - метод реєстрації та вивчення біоелектричної активності рухових волокон і РО м'язу за допомогою голчастих електродів при їх введенні, в спокої, і при довільній активації м'язів. Метод є інвазивним і болючим, однак дозволяє визначати такі механізми роботи нервово-м'язового апарату, які погано виявляються поверхневою ЕМГ.

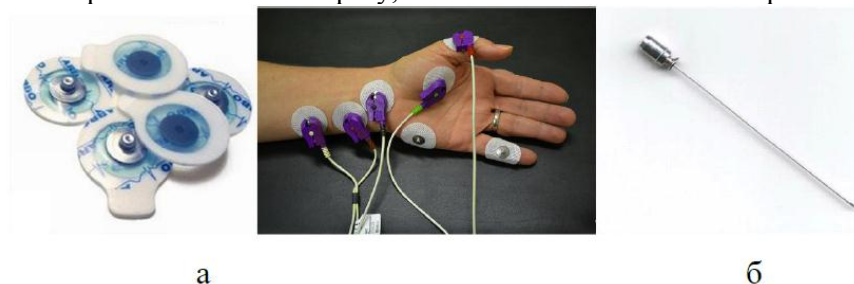


Рис. 3. Види електродів: а - поверхневі електроди, б - голчастий електрод

Одним з перспективних та ефективних методів управління протезами є електроміографічний (міоелектричний) метод, який є більш безпечним для організму. Він використовує поверхневі електроди для зчитування електричної активності м'язів людини. Основною вимогою при використанні обраного методу управління є збереження активності і цілісності м'язового волокна, що відповідає за управління відсутньої кінцівки.

На рис. 4 представлена структурна схема біоелектричного протеза кисті. Основною функцією протеза є згинання та розгинання пальців. Для реалізації даних процесів, використовується мікроконтролер (МК) і сервопривід.

За допомогою поверхневих електродів з культі пацієнта проводиться реєстрація біопотенціалів з м'язів передпліччя людини. Далі сигнал надходить на блок управління, в якому відбувається його перетворення з аналогової форми в цифрову.

Блок управління (рис. 5) перетворює сигнал з м'язів, і складається з підсилювача, смугового фільтра, підсилювача і випрямляча. Блок формування команд включає в себе мікроконтролер і сервопривід.

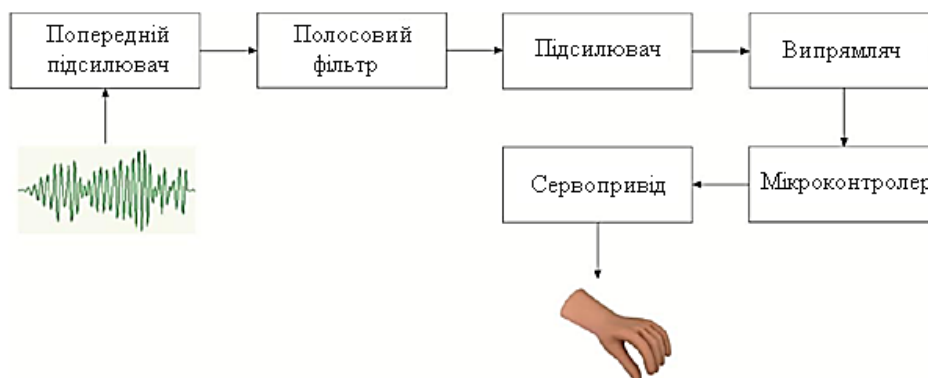


Рис. 5. Структурна схема блоку управління і блоку формування команд біоелектричним протезом кисті

Середнє значення амплітуди електроміограми коливається в межах 20-200 мкВ. З сигналом такої величини практично неможливо працювати, тому для подальшої роботи, біосигнал подається на підсилювач блоку управління. Для ЕМГ характерна хаотична шумова форма, отже, підсилюючи керуючий сигнал, посилюються і шуми. Для отримання інформативного сигналу, сигнал з підсилювача подається на фільтр. Область оптимальних

частот ЕМГ лежить в діапазоні 20-500 Гц, тому доцільно буде використовувати смуговий фільтр.

Для усереднення сигналу і отримання позитивної частини напруги. Для того щоб виконати це завдання ставлять в схему двонапівперіодний випрямляч, який діє як обвідний детектор, що використовується для усунення сигналу і отримання позитивної частини напруги сигнал після підсилення і смугової фільтрації сигналу (рис. 6).

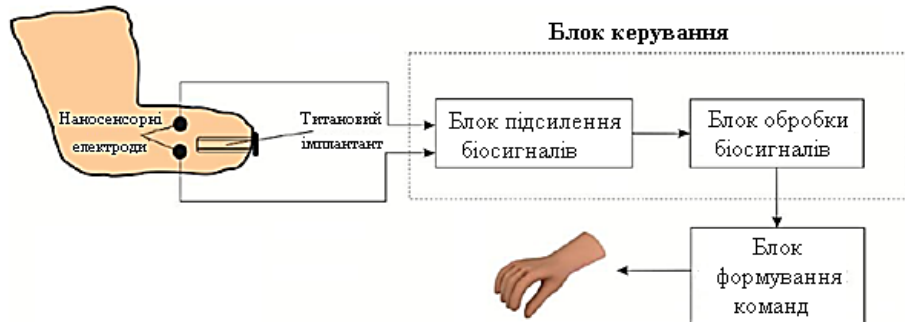


Рис. 4. Структурна схема управління біоелектричним протезом кисті

Потім обвідний детектор супроводжується низькочастотним фільтром для згладжування пульсацій в сигналі, що діє в якості інтегратора. Далі сигнал подається на вхід АЦП мікроконтролера і на виході ми повинні отримати перетворений аналоговий сигнал і цифровий, який буде визначати кут повороту механізму.

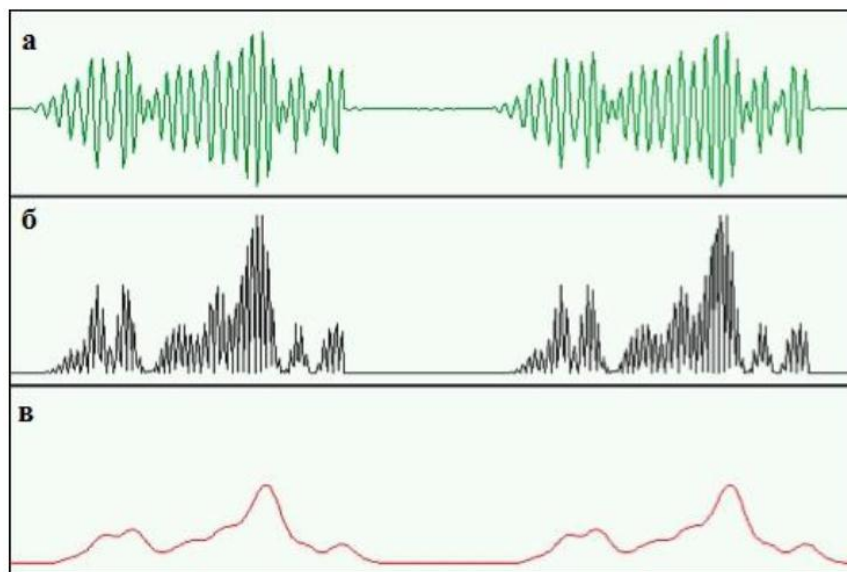


Рис. 6. а - сигнал з ЕМГ; б - підсилений і випрямлений сигнал; в - сигнал з виходу мікроконтролера

Мікроконтролер, порівнює амплітуду сигналу ЕМГ (20-200 мкВ), результат порівняння передає на сервопривід. Кут повороту сервоприводу регулюється тривалістю ЕМГ. Якщо на мікроконтролер надходить вхідний сигнал, нижче встановленого діапазону, значить, м'язи знаходяться в стані спокою і двигун приймає початковий стан до наступної активності м'язів. Діапазон значень, що регулюють роботу мікроконтролера, встановлюється для кожного пацієнта індивідуально.

Отже, біоелектричний вплив, переданий від центральної нервової системи до м'язів, відображається підвищенням амплітуди в так званих рухових точках - місцях найбільшого скупчення РО. Область рухової точки є максимально збудливим ділянкою м'язи. Якщо знімати біопотенціал в місцях розташування рухових точок, то ми можемо отримати вихідні сигнали для управління протезом. Використавши запропоновану структурну схему управління біоелектричним протезом кисті отримаємо виконання основної рухової функції людської кисті руки – згинання та розгинання пальців.

**Інформаційні джерела**

1. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 689 с.
2. Н.А. Бернштейн. О построении движений. М., Машиностроение, 1975
3. А.И. Корендяев, С.В. Левин. Принципы построения захватных устройств с рекуперацией энергии. Проблемы машиностроения и автоматизации, 1990, № 3.

УДК 681.51

**Мороз С.А. к.т.н., Пташенчук В.В. к.т.н., Приступа С.О. к.т.н., Кайдик О.Л. к.т.н.**

Луцкий национальный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ БИОСИГНАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОТЕЗЫ**

*В статье проведен анализ двигательной деятельности человека. Установлено, что управление сократительной активностью мышечной клетки осуществляется с помощью мотонейронов - нервных клеток, тела которых лежат в спинном мозге, а длинные ответвления - аксоны в составе двигательного нерва подходят к мышцам, Биоэлектрическое влияние, переданное от центральной нервной системы в г. мышцы, отражается повышением амплитуды в так называемых двигательных точках - местах наибольшего скопления двигательных единиц. Если снимать биопотенциал в местах расположения двигательных точек, то мы можем получить выходные сигналы для управления протезом. Электромиография является основным методом исследования нервно-мышечной системы с помощью регистрации биоэлектрических потенциалов. ЭМГ исследования показывают, что амплитуды биопотенциалов варьируются от 5-10 мкВ (мышца в состоянии покоя) до 500-1000 мкВ (мышца в возбужденном состоянии). Основной диапазон частот биопотенциалов, регистрируемых поверхностными электродами, составляет 20-200 Гц, с максимумом около 50 - 100 Гц. Предложена структурная схема управления биоэлектрическим протезом кисти.*

**Ключевые слова:** двигательная деятельность, биопотенциал, биоэлектрический протез.

UDC 681.51

**Moroz S. , Ptashenchuk V., Pristupa S., Kaydik A.**

Lutsk National Technical University

**HUMAN MOVEMENT ACTIVITY EXAMINATION FOR THE DETERMINATION OF THE RELEVANT BIOSIGNALS FOR MANAGEMENT BY BIOELECTRIC PROTESIS**

*In the article the analysis of human motor activity is carried out. It was established that the management of contractile activity of the muscle cell is carried out with the help of motor neurons - nerve cells whose bodies lie in the spinal cord, and long branches - the axons within the motor nerve are suitable for muscles, the bioelectric effect, transmitted from the central nervous system to muscles, is reflected by an increase in the amplitude in the so-called motor points - the places of the largest accumulation of moving units. If we remove the biopotential in the locations of the motor points, then we can get the output signals for controlling the prosthesis. Electromyography is the main method of studying the neuromuscular system by registering bioelectric potentials. Electromyographic studies show that the amplitudes of biopotentials vary from 5-10  $\mu$ V (muscle in rest) to 500-1000  $\mu$ V (excited muscle). The main range of frequencies of biopotentials recorded by surface electrodes is 20-200 Hz, with a maximum of about 50-100 Hz. The structural scheme of bioelectric prosthesis control of the brush is proposed.*

**Key words:** motor activity, biopotential, bioelectric prosthesis.

УДК 621.396

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-18>

Петренко О.В., Ільченко М.В.

Начальник Спеціального конструкторського бюро  
ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»

### ВИКОНАВЧІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ДАТЧИКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХВИЛЕЮ КОРІОЛІСОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА

Розглянуто основні властивості виконавчих елементів та датчиків системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопу (КВГ). Обрано такі типи п'єзокерамічних пластин, параметри яких дозволять оптимально виконувати свої функції у складі гіроскопу.

Проведено розрахунок співвідношення між напругами на виході в залежності від напруги, яка подається на вхід п'єзокерамічного виконавчого елемента на резонансній частоті, що дозволить оцінити необхідність використання додаткових підсилювачів.

**Ключові слова:** вібраційний гіроскоп, п'єзокераміка, вихідна напруга

**Вступ.** Принцип вимірювання кутової швидкості Коріолісового вібраційного гіроскопа (КВГ) заснований на інерційних властивостях пружних хвиль, збуджуваних в циліндричному резонаторі на звуковій частоті, тому вибір виконавчих елементів є однією з найважливіших задач в проектуванні датчиків кутової швидкості подібного типу.

Виконавчими та вимірювальними елементами (електродами) системи керування хвилею КВГ, які використовують металеві резонатори, є п'єзокерамічні пластини, що володіють прямим та зворотним п'єзоэффектами. Ці пластини приклеюються на резонатор, до них припаюються провідники через які подаються напруги і знімаються заряди, що в буферному каскаді перетворюються в напруги.

При прикладанні періодичної напруги до п'єзодатчиків збудження на резонансній частоті в резонаторі КВГ формується стояча вібраційна хвиля (первинна хвиля). При обертанні резонатора виникає сила Коріоліса, яка збуджує коріолісову (вимірювану) моду коливань (вторинна хвиля) (рис.1).

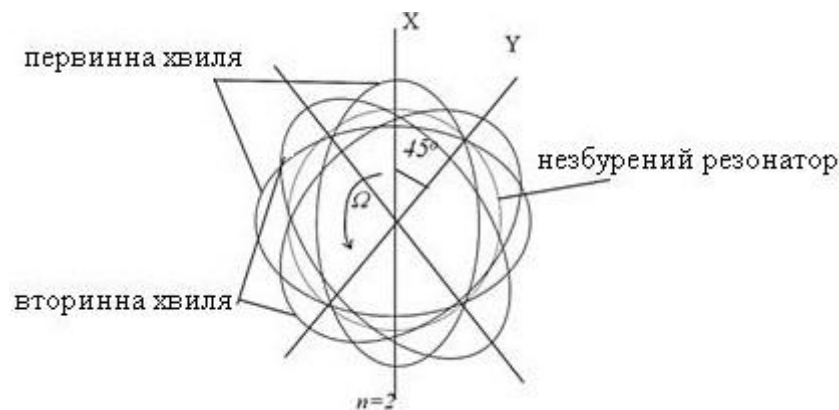


Рис.1. Первинна та вторинна хвилі резонатора.

П'єзоелектричні матеріали умовно можна розділити на дві групи [1]:

1. П'єзоелектричні монокристали. Природні п'єзоелектричні матеріали мають досить високу вартість. У зв'язку з цим, потреби електроніки, в даний час, задовольняються синтетичними п'єзоелектричними монокристалами, які вирощуються у спеціальних установках. П'єзоелектричні властивості таких кристалів з досить високою повторюваністю можна задавати шляхом композиції компонентів, що входять до його складу.

Вирощені кристали певним чином ріжуться на пластини, деякі (сегнетоелектрики) поляризуються, і з них шляхом шліфування і нанесення електродів виготовляються п'єзоелектричні елементи.

До природних п'єзоелектричних монокристалів відносяться кварц і його похідні: безбарвний кварц – гірський криштал, фіолетовий – аметист, димчастий – раухтопаз, чорний – морион, золотистий – цитрин тощо.

2. П'єзоелектрична кераміка. П'єзокераміка належить до ферроелектричних матеріалів. Ферроелектричні матеріали – це матеріали, які поляризовані без додавання до них електричного поля. Це явище називається спонтанною поляризацією. Характерною рисою цього стану є термодинамічно стабільна оборотність осі поляризації при впливі електричного поля. Оборотність поляризації і зв'язок між електричними і механічними ефектами є найзначнішими в цьому матеріалі, який широко використовується в техніці. Найбільш популярний матеріал, який використовується на практиці це свинцево-цирконієвий титан (lead-zirconate-titanate, PbTiO<sub>3</sub>-PbZrO<sub>3</sub>, (PZT)). Цей матеріал не є ферроелектриком при температурах вище деякої граничної температури, яка називається температурою Кюрі.

Ферроелектричні кристали діляться на області, звані доменами, кожен домен має однакову поляризацію, а різні домени мають різні напрямки поляризації. У полікристалічній кераміці окремі кристали мають кілька доменів, розділених стінками. У разі великих змін електричного поля або механічної напруги, відбувається зміщення зарядів і поляриність всього домену змінюється на протилежне в результаті реформування домену. Ці процеси і незворотність зміщення стінок домену є одними з причин виникнення гістерезису в п'єзокераміці. При виготовленні п'єзокераміки полікристали спікаються і під впливом високої температури спікання домени деполаризуються. У цьому стані існує майже рівномірний розподіл напрямків спонтанної поляризації доменів. Матеріал в цьому стані є ізотропним, тобто не п'єзоелектриком. При додаванні сильного електричного поля, спонтанна поляризація переорієнтується на насичену поляризацію. Цей процес, в кінцевому підсумку, призводить до залишкової поляризації, паралельної прикладеному електричному полю і матеріал стає анізотропним, тобто п'єзоелектриком.

Поляризація, зазвичай, є остаточним процесом при виготовленні п'єзокерамічних елементів, хоча за нею слідує термостабілізація і контроль параметрів.

**Основні параметри п'єзокераміки.** Параметри п'єзокераміки залежать від напрямку докладання зусиль і електричної напруги. Однак у спрощеній формі їх можна записати наступним чином [2]:

$$\begin{aligned} D &= d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E ; \\ S &= s^E \cdot T + d \cdot E \end{aligned} \quad (1)$$

де  $D$  – діелектричні зміщення,  $T$  – механічна напруга,  $E$  – напруженість електричного поля,  $S$  – механічна деформація,  $d$  – п'єзоелектрична постійна заряду,  $\varepsilon^T$  – сприйнятливості або відносна діелектрична постійна (при постійній температурі),  $s^E$  – постійна пружності (при  $E = \text{const}$ ).

Значення п'єзоелектричних постійних залежать від напрямку і мають індекси, що вказують їх напрямки. Вектор поляризації зазвичай спрямований уздовж осі  $Z$  (3-ї осі) декартової системи координат. Параметри за напрямками задаються нижніми індексами 1, 2, 3, які відповідають напрямкам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис.2). Механічні зсувні напруження (пари) навколо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  задаються нижніми індексами 4, 5, 6, відповідно.

П'єзокераміка характеризується наступними основними параметрами [3]:

– сприйнятливості або відносна діелектрична постійна,  $\varepsilon$  – це міра поляризованості матеріалу. Спрямованість сприйнятливості виражається компонентами тензора, індекси якого вказують напрям електричного поля і напрям діелектричного зсуву. Наприклад,  $\varepsilon_{33}^T$  описує значення поляризації в напрямку 3 і напрямком діелектричного зсуву також 3, при постійній механічній нарузі  $T$ .  $\varepsilon_{31}^T$  описує значення поляризації в напрямку 3, а напрямком діелектричного зсуву 1 при постійній механічній нарузі  $T$ .

– п'єзоелектрична постійна напруги,  $g$  визначається як відношення напруженості електричного поля  $E$  до ефективної механічної напруги,  $T$ :  $g = -E/T$ , але так як  $V = El$ , де  $l$  – довжина пластини, а  $T = F/A$ , де  $A$  – поперечний переріз пластини,  $F$  – діюча сила, то можна користуватися і іншим співвідношенням:  $V = -g_{31}Fl/A$ . Коефіцієнт  $g_{31}$  описує електричне поле індукване в напрямку 3, механічною напругою, прикладеною в напрямку 1. Саме цей коефіцієнт  $g_{31}$  визначає ефективність збудження і компенсації хвилі в резонаторі, шляхом подачі на п'єзокераміку відповідної напруги.

– п'єзоелектрична постійна заряду,  $d$  або постійна деформації – це міра індукваного заряду у відповідь на механічне напруження (або прикладання сили).  $d_{ij}$  – щільність заряду, що



отримується при одиничній механічній напрузі. Коефіцієнт  $d_{31}$  визначає чутливість і точність вимірювань коливань резонатора.

– постійна пружності або податливості,  $s$ – це відносна механічна деформація  $S$  при дії одиничної механічної напруги  $T$ :  $s=S/T$ . Модуль Юнга п'єзокераміки  $Y=1/s$ . Коефіцієнт  $s_{33}^E$  описує відношення механічної деформації в напрямку 3 до механічної напруги в тому ж напрямку при постійному електричному полі ( $E = const$ ).

– коефіцієнт втрат або тангенс кута втрат,  $tg\delta$  – це відношення активного опору п'єзокераміки до його реактивного опору або величина, що зворотна добротності:  $tg\delta = 1/Q$ .

– коефіцієнт зв'язку,  $k$  – це міра ефективності п'єзоелектричного ефекту. Цей коефіцієнт описує здатність п'єзоелектричного матеріалу перетворювати електричну енергію в механічну і навпаки. Коефіцієнт зв'язку дорівнює кореню квадратному відносини збереженої енергії до сумарної енергії переданої матеріалу.  $k_{33}$ – коефіцієнт зв'язку для поздовжніх коливань,  $k_{31}$ – коефіцієнт зв'язку для поперечно-поздовжніх коливань.

Моди п'єзокераміки визначаються його геометрією, пружними властивостями і напрямом поляризації. Найбільш важливі моди п'єзопластини з відповідними постійними показані на рис.3.

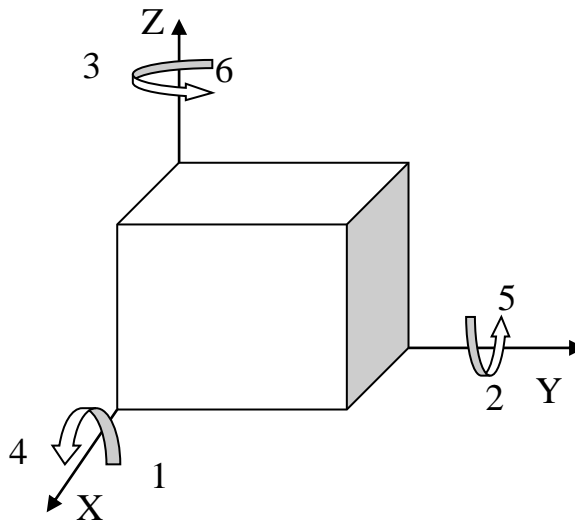


Рис.2. Декартова система координат, яка описує параметри п'єзоматеріала.

Осі	Пластина			Коефіцієнт
Поперечні коливання товщини				
3	Полярність	Ел. поле (E)	Деформації	$d_{33}, g_{33}, k_{33}$
				$s_{33}, \epsilon_{33}$
Повздовжні коливання				
2				$d_{31}, g_{31}, k_{31}$
				$s_{11}, \epsilon_{33}$

Рис.3. Моди коливань п'єзокерамічної пластины.

Для проведення досліджень було вибрано три типи п'єзокерамічних пластин: APC840, PIC181 та NCE41, що за даними виробників мають оптимальні параметри для роботи в складі вібраційного гіроскопа. Основні параметри п'єзокерамічних пластин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри п'єзокерамічних пластин

Марка	Параметр											
	$\frac{T}{\epsilon_{33} \epsilon_0}$	$\text{tg}\delta$ 10 <sup>-4</sup>	$k_p$ %	$k_{33}$ %	$k_{31}$ %	$-d_{31}$	$d_{33}$	$g_{33}$	$-g_{31}$	$s_{33}$	$s_{11}$	$T_c$ °C
						10 <sup>-12</sup> C/N		10 <sup>-3</sup> Vm/N		10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N		
APC851	1950	150	0,71	0,51	0,36	175	400	24,8	12,4	н.д.	н.д.	360
PIС181	1200	30	0,56	0,66	0,32	120	265	25	11,2	14,2	11,8	330
NCE41	1350	40	0,57	0,68	0,33	130	310	25	11	16	13	290

Після приклеювання п'єзокерамічних пластин на металевий резонатор генератора коливань чутливого елемента вібраційного гіроскопа була проведена перевірка залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури в діапазоні [-40 ... + 80] °C [3].

Було визначено, що п'єзокерамічні пластини марки PIС181 мають лінійну залежність ємності від температури і саме їх доцільно використовувати при розробці вібраційних гіроскопів.

**Співвідношення напруг на вході та виході чутливого елемента.** Проведемо розрахунок співвідношення між напругами на виході вимірювальної п'єзокераміки (п'єзокерамічного датчика) в залежності від напруги, яка подається на вхід п'єзокерамічного виконавчого елемента на резонансній частоті. Фактично, це визначає коефіцієнт посилення чутливого елемента КВГ (резонатора з датчиками знімання і збудження коливань) по напрузі.

Припустимо, що клейовий шар має малу товщину в порівнянні з товщиною резонатора і п'єзокераміки та її впливом на передачу механічного впливу можна знехтувати. Реальні співвідношення товщини: п'єзокерамічні пластини – 200 мкм, резонатор – 400 мкм, клей – 3 мкм. Крім того, так як модуль Юнга металевого резонатора значно перевищує модуль Юнга п'єзокераміки, то будемо вважати, що з'єднання п'єзокераміка-резонатор має модуль Юнга матеріалу резонатора.

Напруга  $V_{out}$  на виході вимірювальної п'єзокераміки прямокутної форми запишеться наступним чином [4]:

$$V_{out} = \frac{g_{31} F}{l}, \quad (2)$$

де  $g_{31}$  – п'єзоелектрична постійна напруги,  $l$  – довжина п'єзокераміки,  $F$  – сила, що діє на п'єзокераміку.

Сила  $F$  визначається співвідношенням:

$$F = \sigma l t_p, \quad (3)$$

де  $\sigma$  – механічне напруження,  $t_p$  – товщина п'єзокераміки.

Для малих деформацій виконується закон Гука – механічне напруження лінійно пов'язане з відносним подовженням  $\omega = \Delta l / l$  з коефіцієнтом пропорційності рівним модулю Юнга з'єднання п'єзокераміка-резонатор,  $E_r$ .

$$\sigma = E_r \omega. \quad (4)$$

Відносне подовження  $\omega$  генерує в п'єзокераміці електричну напругу  $V_{in}$ , яке визначається за формулою:

$$\omega = \frac{d_{31}}{t_p} V_{in}, \quad (5)$$

де  $d_{31}$  – п'єзоелектрична постійна заряду.

Визначаючи силу  $F$  із співвідношень (3), (4) та (5), та підставляючи результати в (2), отримаємо:

$$V_{out} = g_{31} d_{31} E_r V_{in} \quad (6)$$

Підставляючи значення  $g_{31}$ ,  $d_{31}$  із таблиці 1 для PIС181 та модуль Юнга матеріалу резонатора  $E_r = 2 \times 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, отримаємо:

$$V_{out} \approx 0.13 V_{in} \quad (7)$$

На рис.4 представлені графіки амплітуд напруг, які подаються на збудження і які знімаються з п'єзокерамічних датчиків для реального КВГ.

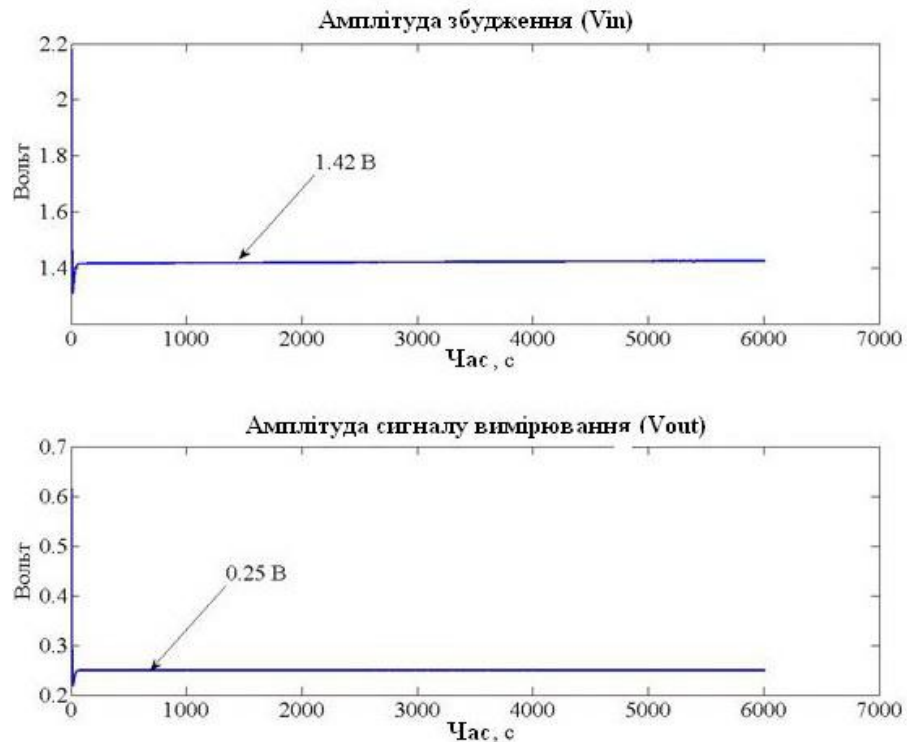


Рис.4. Відношення між вхідним ( $V_{in}$ ) та вихідним ( $V_{out}$ ) напругами в чутливому елементі реального КВГ

Як видно з графіків, відношення між  $V_{out}$  та  $V_{in}$  для реального КВГ становить 0.17, що досить близько до значення 0.13. Таким чином, спрощена методика оцінки відносини  $V_{out} / V_{in}$  дає прийнятний результат і досить добре узгоджується з експериментальними даними представленими на рис.4.

**Висновки.** Представлена спрощена методика оцінки відносини  $V_{out}/V_{in}$  дає прийнятний результат і досить добре узгоджується з експериментальними даними.

Для забезпечення більш високого відношення сигнал / шум на виході чутливого елемента КВГ слід використовувати п'єзокерамічні матеріали з високими значеннями коефіцієнтів  $d_{31}$  і  $g_{31}$ . Максимальне співвідношення  $V_{out} / V_{in}$  досягається при використанні жорсткої п'єзокераміки для збудження коливальних елементів – для знімання сигналу.

П'єзокераміка P181 забезпечує задовільне функціонування КВГ з металевим резонатором без використання підсилювача сигналів.

#### Список літератури:

1. В. JAFFE, W. Jr. COOK and H. JAFFE, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, New York, 1971.
2. <http://piceramic.com/piezo-technology/fundamentals.html>.
3. О.В.Петренко, В.Г.Цірук. Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків від температури в складі чутливого елемента вібраційного гіроскопа/ХІМіжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухомі конструювання авіаційно-космічної техніки».
4. "Fundamentals of Piezoelectricity".  
<https://pdfs.semanticscholar.org/f063/529f370fa281407ba82e5803098940c0ba26.pdf>

УДК 621.396

**Петренко А.В., Ильченко Н.В.**

ПАО «НПО «Киевский завод автоматики»

#### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ДАТЧИКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНОЙ КОРИОЛИСОВОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА

Рассмотрены основные свойства исполнительных элементов и датчиков системы управления волной кориолисового вибрационного гироскопа (КВГ). Выбраны следующие типы

пъезокерамических пластин, параметры которых позволят оптимально выполнять свои функции в составе гироскопа. Проведен расчет соотношения между напряжениями на выходе в зависимости от напряжения, которое подается на вход пъезокерамического исполнительного элемента на резонансной частоте, что позволит оценить необходимость использования дополнительных усилителей.

Ключевые слова: вибрационный гироскоп, пъезокерамика, выходное напряжение

UDC 621.396

**Petrenko O., Ilchenko M.**

PJSC "RPA "Kyiv automatics plant"

**EXECUTIVE ELEMENTS AND SENSORS OF THE CORIOLIS VIBRATORY GYROSCOPE  
WAVE CONTROL SYSTEM**

The basic properties of the executive elements and sensors of the Coriolis vibratory gyroscope (CVG) wave control system are considered. Piezoceramic plates are selected with parameters that allow optimizing the performance of their functions as part of the gyroscope. The ratio between the output voltage and the voltage applied to the input of the piezoceramic actuator at the resonant frequency is calculated, enables to estimate the need for using additional amplifiers.

**Key words:** vibratory gyroscope, piezoceramics, output voltage

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-19>

Піскач Л. В., Цісар О. В., Марушко Л. П.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

**ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМАХ  $PbGa_2X_4-SiX_2$  (X – S, Se)**

Методами диференційно-термічного, рентгенофазового та мікроструктурного аналізів досліджено фазові рівноваги в системах  $PbGa_2X_4-SiX_2$  (X –S, Se) та побудовано їх діаграми стану. В сульфуровмісній системі знайдено нову сполуку складу  $PbGa_2SiS_6$ , яка має інконгруентний характер плавлення при 975 К. В системі з Селеном підтверджено існування сполуки  $PbGa_2SiSe_6$  та встановлено перитектичний характер її утворення при 936 К. В системах існує незначна розчинність на основі вихідних сполук.

**Ключові слова:** фазові рівноваги, рентгенофазовий аналіз, диференційно-термічний аналіз, мікроструктурний аналіз, квазібінарна система, діаграма стану.

**Вступ.** Сучасний етапу розвитку електронної техніки характеризується використанням нових матеріалів із покращеними властивостями в порівнянні із класичними Si, Ge,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{IV}B^VI$ . Завдяки своїм унікальним властивостям одними з найбільш перспективних нелінійно-оптичних матеріалів, що затребувані для застосування в середньому і далекому ІЧ діапазонах спектра, є монокристали сполук  $AgGaS_2$  і  $AgGaSe_2$ . ІЧ кристали мають високий показник ефективної нелінійності, широку смугу пропускання, некритичні вимоги температурної стабілізації і придушення вібрацій. Ще одними із перспективних НЛО матеріалів є  $PbGa_2S_4$  і  $PbGa_2Se_4$  [1], які володіють подібними параметрами.

**Огляд літератури.** Недавно виявлено ряди нових сполук (типу 4-4-1-12:  $Pb_4Ga_4GeX_{12}$  [2] та 1-2-1-6:  $PbGa_2Ge(S,Se)_6$ ,  $SnGa_2Ge(S,Se)_6$ ,  $PbGa_2SiSe_6$ ,  $PbGa_2Ge(Si)Se_6$  [3-8]), що володіють якісно новими фізичними властивостями та які є базою для створення нелінійно-оптичних матеріалів. Тетрарні сполуки типу 1-2-1-6 мають показники нелінійності вищі за  $AgGa(S,Se)_2$  (рекордні показники генерації другої гармоніки (ГДГ)) і майже на порядок кращу стійкість до потужного випромінювання. Крім того вони мають значно більш довгохвильову границю ІЧ прозорості (до 23 мкм) і більш прийнятливий двопроменезаломлення для фазового синхронізму перетворюваного випромінювання в діапазоні 1-10 мкм. Перші опубліковані дослідження цих сполук акцентовані на технологію вирощування кристалів, структурні рентгенівські дослідження, зонну енергетичну структуру (XPS та DFT-розрахунки) і деякі попередні оптичні характеристики.

Дана робота присвячена вивченню фізико-хімічної взаємодії на перерізах  $PbGa_2X_4-SiX_2$  (X–S, Se) для виявлення нових та встановлення способу утворення відомих тетрарних фаз.

Тетрарні халькогеніди  $PbGa_2X_4$  (X – S, Se) є одними із перспективних нелінійно-оптичних матеріалів, які працюють в середній ІЧ-області. Сполука  $PbGa_2S_4$  утворюється в системі  $Ga_2S_3-PbS$ , володіє конгруентним характером плавлення при 1163 К. Кристали  $PbGa_2S_4$  жовтого кольору, кристалізуються в ромбічній структурі (ПГ  $Fddd$ ) з параметрами ґратки  $a = 2,070$ ,  $b = 2,038$ ,  $c = 1,215$  нм [9-11]. Аналогічна селеновмісна сполука ( $PbGa_2Se_4$ ) утворюється за перитектичною реакцією при 1053 К і володіє вузькою областю гомогенності, кристалізується в ромбічній сингонії (ПГ  $Fddd$ ) з параметрами елементарної ґратки  $a = 1,064$ ,  $b = 1,074$ ,  $c = 0,636$  нм [12]. Сполуки  $SiS_2$  та  $SiSe_2$  утворюються конгруентно при 1325 і 1245 К відповідно. Кристалічну структуру їх розглядають як протяжні ланцюгові утворення, побудовані з катіонцентрованих тетраєдрів, сполучених ребрами [13].

**Матеріали та методи.** Для дослідження фазових рівноваг зразки синтезували з високочистих простих речовин: свинцю, кремнію, галію, сірки та селену (вміст основного компонента більший, ніж 99,9 мас. %). Зразки виготовляли сплавленням у вакуумованих кварцових ампулах. Синтез проводили в печі шахтного типу. Нагрівання сульфуровмісних зразків спочатку проводили до 670 К зі швидкістю 30 К/год, за якої витримували впродовж доби (для зв'язування сірки), а потім до максимальної температури (1350 К). Селеновмісні зразки відразу нагрівали до максимальної температури (1300 К), при якій витримували 5 год. Далі розплави охолоджували з швидкістю 10–20 К/год до температури відпалу (670 К), який проводили для встановлення рівноважного стану протягом 500 год. Після відпалу ампули зі зразками загартовували до кімнатної температури у холодній воді.

Отримані сплави досліджували методами рентгенофазового, диференційно-термічного та мікроструктурного аналізів. Дифрактограми зразків отримували на дифрактометрі ДРОН 4-13 з використанням  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінювання, реєстрація проводилася у межах  $2\theta$  10-80° з кроком лічильника 0,05° та часом збору інформації 5с у точці. Диференційно-термічний аналіз проводили на дериватографі системи F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey, з використанням Pt/Pt-Rh термопари. Нагрів печі здійснювали зі швидкістю 10 К/хв, охолодження – в інерційному режимі. Вивчення мікроструктури проводили на мікротвердометрі Leica VMHT Auto з максимальним збільшенням  $\times 3811$ .

**Результати та їх обговорення.** За одержаними результатами побудовано діаграму стану квазіподвійної системи  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SiS}_2$  (рис. 1).

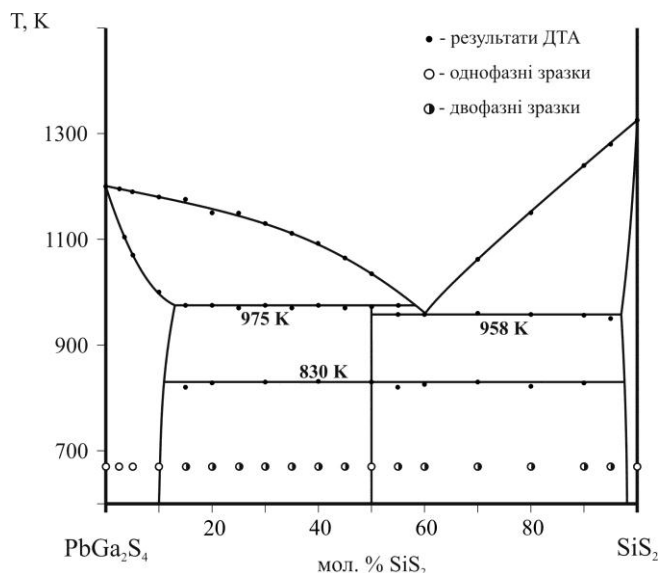


Рис. 1. Діаграма стану системи  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SiS}_2$

Типові рентгенівські дифракційні картини зразків системи представлені на рис. 2.

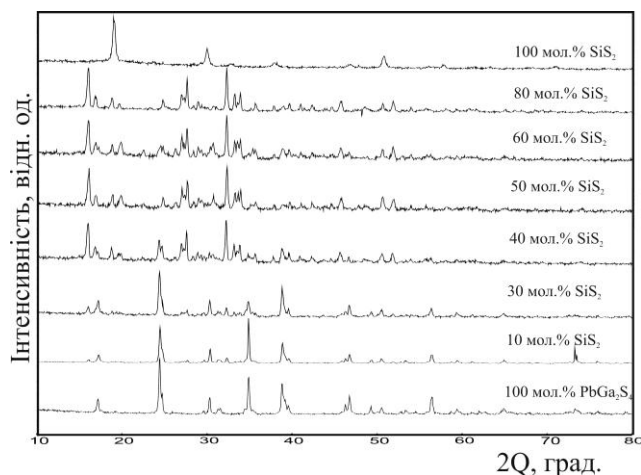


Рис. 2. Дифрактограми зразків системи  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ – $\text{SiS}_2$

У системі утворюються граничні тверді розчини на основі вихідних сполук. Розчинність при температурі відпау 670 К для  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  становить 10 мол. %  $\text{SiS}_2$ , а для  $\text{SiS}_2$  не перевищує 5 мол.%  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ . При еквімолярних співвідношеннях вихідних компонентів має місце утворення нової тетравної сполуки  $\text{PbGa}_2\text{SiS}_6$  за перитектичною реакцією  $L_p + \alpha \leftrightarrow \text{PbGa}_2\text{SiS}_6$  при 975 К ( $\alpha$  – тверді розчини на основі  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$ ). Евтектична взаємодія між тетравною сполукою та сіліцій(IV) сульфідом проходить при 958 К ( $L_e \leftrightarrow \text{PbGa}_2\text{SiS}_6 + \text{SiS}_2$ ).

Діаграма стану системи  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SiSe}_2$  представлена на рис. 3. За рахунок інконгруентного характеру плавлення тернарного селеніду даний переріз є квазібінарним в обмеженому інтервалі температур.

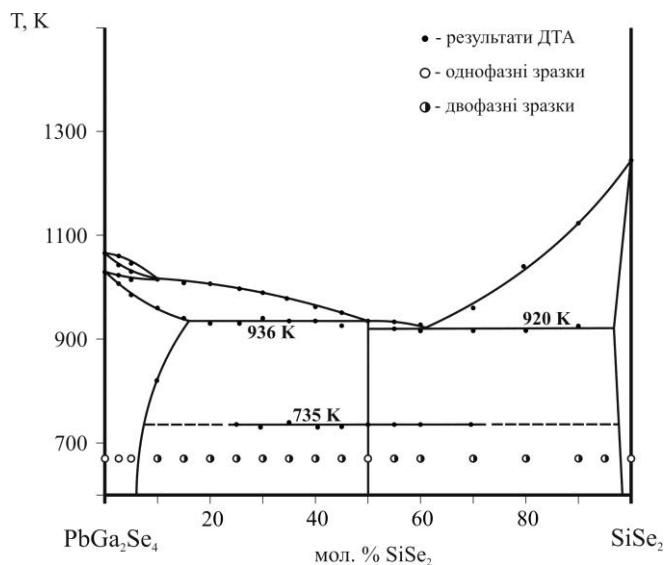


Рис. 3. Діаграма стану системи  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SiSe}_2$

Типові рентгенівські дифракційні картини зразків системи наведені на рис. 4.

Підтверджено утворення сполуки складу  $\text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$  на перерізі при вмісті 50 мол. %  $\text{SiSe}_2$  за перитектичною реакцією  $L_p + \alpha \leftrightarrow \text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$  при 936 К ( $\alpha$  – тверді розчини на основі  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ ). Тетрарна  $\text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$  та бінарна  $\text{SiSe}_2$  сполуки взаємодіють між собою евтектично при 920 К ( $L_e \leftrightarrow \text{PbGa}_2\text{SiSe}_6 + \text{SiSe}_2$ ). За даними РФА і МСА при температурі 670 К протяжність твердого розчину на основі  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  становить близько 5 мол. %  $\text{SiSe}_2$ , а на основі  $\text{SiSe}_2$  – менше 3 мол. %  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ . Для сплавів у межах 5–50 і 50–97 мол. %  $\text{Pb}_2\text{SiSe}_4$  спостерігаються по два набори дифракційних відбиттів, які відповідають вихідним компонентам і тетрарній фазі.

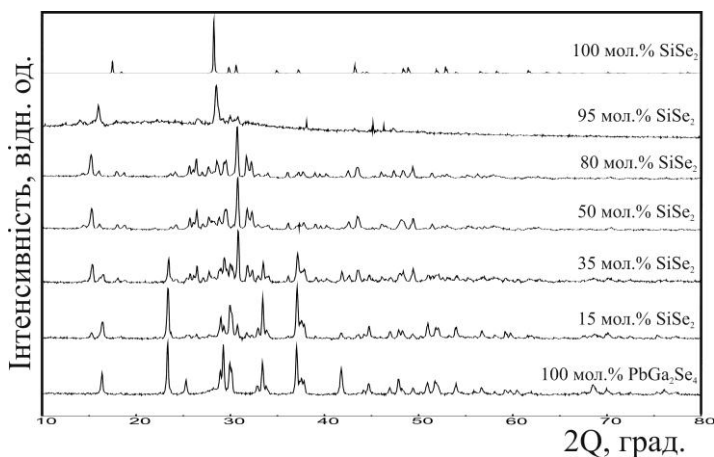


Рис. 4. Дифрактограми зразків системи  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SiSe}_2$

**Висновки.** Використовуючи диференційно-термічний, рентгенофазовий та мікроструктурний аналізи вивчено фізико-хімічну взаємодію в системах  $\text{PbGa}_2\text{X}_4\text{--SiX}_2$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ). Діаграма стану системи  $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{--SiS}_2$  характеризується утворенням нової сполуки  $\text{PbGa}_2\text{SiS}_6$  з інконгруентним характером плавлення при 975 К. В системі  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{--SiSe}_2$  утворюється сполука  $\text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$ , яка плавиться інконгруентно при 936 К. Незначна розчинність на основі вихідних сполук спостерігається в обох системах. Найбільша область гомогенності є на основі сполуки  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  (10 мол. %  $\text{SiS}_2$ ).

Перерізи  $\text{PbGa}_2(\text{Se})_4\text{--SiS}(\text{Se})_2$  є триангулюючими в квазіпотрійних системах  $\text{PbS}(\text{Se})\text{--Ga}_2\text{S}(\text{Se})_3\text{--SiS}(\text{Se})_2$ .

### Інформаційні джерела

1. Сложные халькогениды и халькогалогениды (получения и свойства) / Д. М. Берча, Ю. В. Ворошилов, В. Ю. Сливка, И. Д. Турыница. Львов: Высшая школа, 1983. 184 с.
2. Syntheses, structures, and nonlinear optical properties of quaternary chalcogenides:  $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeQ}_{12}$  ( $\text{Q} = \text{S}, \text{Se}$ ) / Chen YK, Chen MC, Zhou LJ [et al.] // *Inorg. Chem.* 2013. V. 52(15). P. 8334–41. doi: 10.1021/ic400995z.
3.  $\text{PbGa}_2\text{MSe}_6$  ( $\text{M} = \text{Si}, \text{Ge}$ ): Two Exceptional Infrared Nonlinear Optical Crystals / Zhong-Zhen Luo, Chen-Sheng Lin, Hong-Hua Cui, Wei-Long // *Chem. Mater.* 2015. V. 27. P. 914–922.
4. Electronic, optical and thermoelectric properties of  $\text{SnGa}_2\text{GeX}_6$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ) compounds / N. Yousaf, W. Khan, S.H. Khan [et al.] // *J. Alloys Comp.* 2018. V. 737. P. 637–645.
5.  $\text{PbGa}_2\text{GeS}_6$ : An Infrared Nonlinear Optical Material Synthesized by an Intermediate-Temperature Self-Fluxing Method / Y.-Z. Huang, H. Zhang, C.-S. Lin [et al.] // *Cryst. Growth Des.* 2018. V.18(2). P. 1162–1167.
6.  $\text{PbGa}_2\text{GeS}_6$  crystal as a novel nonlinear optical material: Band structure aspects / A. O. Fedorchuk, O. V. Parasyuk, O. I. Cherniushok [et al.] // *J. Alloys Compds.* 2018. V.740. P. 294–304.
7. Фазові рівноваги у системах  $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{–GeS}_2$  та  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4\text{–GeSe}_2$  / О. В. Парасюк, О. І. Чернюшок, О. П. Вронська [та ін.] // Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» (м. Луцьк 01–05 червня 2018 р.). Луцьк, 2018. – С. 81.
8. Спосіб отримання монокристалів  $\text{PbGa}_2\text{GeS}_6$  / Парасюк О.В., Юрченко О.М., Піскач Л.В., Чернюшок О.І. (UA) Патент України на корисну модель № 127740, С30В 11/00. № u201800475; Заявл. 17.01.2018; Опубл. 27.08.2018; Бюл. №16, 2018 р.
9. Головей В. М., Оболончик В. А., Головей М. И. Система  $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{–PbS}$  // *Ж. неорганической химии.* 1981. Т. 26(7). С. 1976–1978.
10. Chilouer A., Mazurier A., Guittard M. Systeme  $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{–PbS}$ . Diagramme de phase, etude cristallographique // *Mater. Res. Bull.* 1979. V. 14 (9). P. 1119–1124.
11. Гордиенко С. П., Головей В. М., Оболончик В. А. Исследование состава паров  $\text{PbGa}_2\text{S}_4$  и  $\text{PbIn}_2\text{S}_4$  // *Укр. Хим. журнал.* 1981. Т. 47(9). С. 931–933.
12. Eholie R., Kom J. K., Flahaut J. Etude des Systemes  $\text{PbSe–Ga}_2\text{Se}_3$  et  $\text{PbSe–GaSe}$  // *C. R. Acad. Sc. Paris.* 1969. V. 268. P. 700–702.
13. Блецкан Д. И. Кристаллические и стеклообразные халькогениды Si, Ge, Sn и сплавы на их основе / Ужгород: Закарпаття, 2004. 290 с.

### Пискач Л. В., Цисар О.В., Марушко Л.П.

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

#### ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ $\text{PbGa}_2\text{X}_4\text{–SiX}_2$ ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ )

Методами дифференциально-термического, рентгенофазового и микроструктурного анализов исследованы фазовые равновесия в системах  $\text{PbGa}_2\text{X}_4\text{–SiX}_2$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ) и построены их диаграммы состояния. В сульфуросодержащей системе найдено новое соединение состава  $\text{PbGa}_2\text{SiS}_6$ , которое имеет инконгруэнтный характер плавления при 975 К. В системе с Селеном подтверждено существование соединения  $\text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$  и установлено перитектический характер его образования при 936 К. В системах существует незначительная растворимость на основании исходных соединений.

**Ключевые слова:** фазовые равновесия, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, микроструктурный анализ, квазибинарная система, диаграмма состояния.

### Piskach L. V., Tsisar O.V., Marushko L. P.

Lesya Ukrainka Eastern European National University

#### PHASE EQUILIBRIA IN THE $\text{PbGa}_2\text{X}_4\text{–SiX}_2$ ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ) SYSTEMS

Phase equilibria and phase diagrams of the  $\text{PbGa}_2\text{X}_4\text{–SiX}_2$  systems ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ) were investigated by X-ray diffraction, differential thermal and microstructure analysis methods. The sulfur-containing system features a new compound of the  $\text{PbGa}_2\text{SiS}_6$  composition that has incongruent melting nature at 975 K. In the selenide system, the existence of the  $\text{PbGa}_2\text{SiSe}_6$  compound and the peritectic nature of its formation at 936 K were confirmed. The systems exhibit minor solid solubility ranges of the end compounds.

**Keywords:** phase equilibria, X-ray phase analysis, differential thermal analysis, microstructure analysis, quasi-binary system, phase diagram.



УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-20>

Полянский В. И., к. т. н.

ООО «Империя металлов», г. Харьков

### УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Теоретически обоснованы условия снижения силовой напряженности механической обработки, состоящие главным образом в повышении коэффициента резания, равного отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и зависящего от условий трения на передней и задней поверхностях резца при точении и от условий трения связки круга с обрабатываемым материалом при шлифовании. Теоретически показано, что при точении коэффициент резания может принимать значительно большие значения, чем при шлифовании. Увеличить коэффициент резания при точении можно уменьшением трения на задней поверхности резца и применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, обладающих высокой остротой и низким коэффициентом трения, а также применением современных сборных твердосплавных и керамических режущих инструментом с износостойкими покрытиями. При шлифовании основным путем повышения коэффициента резания является снижение трения связки круга с обрабатываемым материалом и обеспечение высокой остроты режущих зерен, применяя круги из синтетических сверхтвердых материалов, работающие в режиме самозатачивания.*

**Ключевые слова:** механическая обработка, резание, шлифование, трение, составляющие силы резания, производительность и качество обработки

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** Основным условием повышения эффективности механической обработки является снижение силовой и тепловой напряженностей процесса за счет оптимизации режимов резания и характеристик режущих инструментов. В настоящее время накоплен значительный практический опыт в этом направлении. Однако с применением новых обрабатываемых и инструментальных материалов, повышением требований к точности и качеству обрабатываемых поверхностей деталей постоянно возникают новые задачи определения оптимальных условий обработки с целью повышения производительности и качества. В связи с этим в настоящей работе предложено важное и актуальное теоретическое решение задачи снижения силовой напряженности механической обработки лезвийными и абразивными инструментами. Это позволяет выявить основные факторы, наиболее ответственные за формирование параметров силовой напряженности процесса, и определить условия управления ими для снижения силовой напряженности процесса. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам снижения параметров силовой напряженности механической обработки в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. В работе [3] теоретически установлено, что тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания, условное напряжение резания (энергоемкость обработки)  $\sigma = P_z / (a \cdot b)$  всецело зависят от коэффициента резания  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ :

$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (1)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$  – толщина и ширина среза, м;  $\psi$  – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, град. ( $tg \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  –

положительный передний угол инструмента, град;  $\tau_{сдв}$  – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

Как следует из приведенных зависимостей, увеличение коэффициента резания  $K_{рез}$  приводит к снижению тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания, условного напряжения резания (энергоёмкости обработки)  $\sigma = P_z / (a \cdot v)$  и соответственно к повышению эффективности механической обработки. Однако в данном случае расчет коэффициента резания  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$  произведен без учета трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом. Поэтому более полное знание закономерностей изменения коэффициента резания  $K_{рез}$  позволит научно обоснованно подходить к определению условий повышения эффективности механической обработки.

**Цель работы** – определение путей повышения производительности и качества на основе снижения силовой напряженности механической обработки.

**Материалы исследований.** В работе [4] приведена аналитическая зависимость для определения отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания  $P_z / P_y$  при точении с учетом процесса трения на задней поверхности резца при условии  $\gamma = 0$ , которая применительно к процессу точения лопаточным резцом с радиальной подачей (без продольной подачи) принимает вид (рис. 1):

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{z1} + P_{z2}}{P_{y1} + P_{y2}} = \frac{P_{z1} + P_{z2}}{f \cdot P_{z1} + \frac{P_{z2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}{\frac{1}{f} + f \cdot \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}, \quad (4)$$

где  $P_{z1}$ ,  $P_{z2}$  – тангенциальные составляющие силы резания, возникающие соответственно на передней и задней поверхностях режущего инструмента, Н;  $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$  – составляющие силы резания  $P_y$ , возникающие соответственно на передней и задней поверхностях режущего инструмента в плоскости  $uox$ , Н.

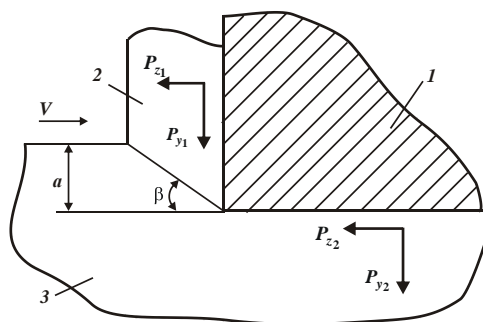


Рис. 1. Расчетная схема параметров процесса точения с учетом трения на задней поверхности резца: 1 – резец; 2 – образующая стружка; 3 – обрабатываемый материал ( $\beta$  – условный угол сдвига обрабатываемого материала)

Расчетами установлено, что отношение  $P_z / P_y$  с увеличением отношения  $P_{z1} / P_{z2}$  непрерывно увеличивается, начиная со значения  $f$ , асимптотически приближаясь к значению  $1/f$  (рис. 2). Этим показано, что при точении (при незначительной интенсивности трения на задней поверхности резца) отношение  $P_z / P_y$  может быть больше единицы. В противном случае, т.е. при значительной интенсивности трения на задней поверхности резца, отношение  $P_z / P_y$  меньше единицы, что свидетельствует о низкой эффективности процесса резания затупившимся резцом и согласуется с известными экспериментальными данными.

Полученное теоретическое решение можно использовать для определения условий снижения силовой напряженности процесса резания лезвийными и абразивными инструментами, что имеет важное научное и практическое значение при решении задач повышения производительности и качества обработки.

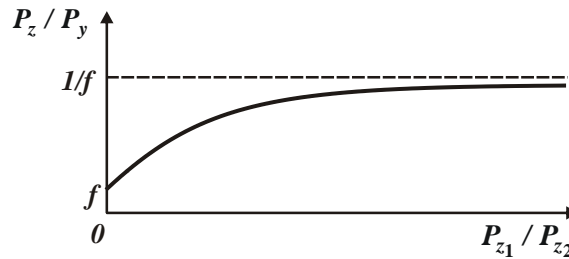


Рис. 2. Зависимость  $P_z / P_y$  от отношения  $P_{z_1} / P_{z_2}$  при условии  $\gamma = 0$

Как показано в работе [4], при условии  $\gamma \neq 0$  характер изменения отношения  $P_z / P_y$  от отношения  $P_{z_1} / P_{z_2}$  описывается зависимостью (рис. 3):

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{z_1} + P_{z_2}}{\frac{P_{z_1}}{K_{рез}} + \frac{P_{z_2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}}{\frac{1}{f} + \frac{1}{K_{рез}} \cdot \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}} \quad (5)$$

В этом случае отношение  $P_z / P_y$  увеличивается от значения  $f$  до значения  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ . Наименьшее значение отношения  $P_z / P_y = f$  достигается при значительном затуплении реза (по задней поверхности), когда  $P_{z_1} \ll P_{z_2}$ .

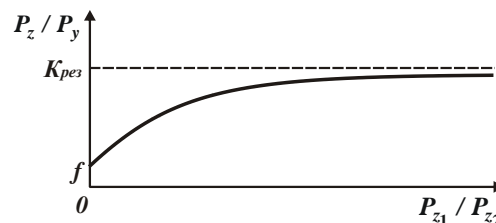


Рис. 3. Зависимость  $P_z / P_y$  от отношения  $P_{z_1} / P_{z_2}$  при условии  $\gamma \neq 0$

При условии  $P_{z_1} > P_{z_2}$  отношение  $P_z / P_y \rightarrow K_{рез}$ . В этом случае фактически отсутствует трение на задней поверхности реза, поскольку резание производится острым режущим лезвием реза. Исходя из зависимости  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ , увеличить  $K_{рез}$  и соответственно повысить эффективность обработки можно уменьшением условного угла трения стружки с передней поверхностью реза  $\psi$  и увеличением положительного переднего угла реза  $\gamma$ .

При резании резцом с отрицательным передним углом коэффициент  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$  уменьшается, что повышает силовую напряженность процесса резания и снижает качество и производительность обработки. В этом случае эффективно использовать резцы из синтетических сверхтвёрдых материалов (СТМ), которые, как правило, применяются при полустойковой обработке с небольшими толщинами среза и с фактически отрицательными передними углами. Благодаря небольшому коэффициенту трения СТМ с обрабатываемым материалом, коэффициент  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$  увеличивается и может принимать значения, близкие к единице или больше единицы, что повышает качество и производительность обработки даже при резании резцами со значительными площадками износа, образовавшимися

на задней поверхности. Эффективно также применять современные режущие твердосплавные и керамические инструменты с износостойкими покрытиями, обеспечивающими высокую режущую способность при высоких температурах резания, что позволяет повысить коэффициент  $K_{рез}$ .

Используя полученные решения, можно объяснить причины повышения энергоемкости и силовой напряженности процесса шлифования, обусловленные наличием отрицательных передних углов у режущих зерен. При этом, как известно, в процессе шлифования имеет место интенсивное трение связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к дополнительному повышению силовой и тепловой напряженностей процесса обработки. В этом случае в зависимости (4) вместо коэффициента трения  $f$  на задней поверхности резца следует рассматривать коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом, а вместо коэффициента  $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$  – значение коэффициента  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$ , определяющего процесс резания абразивными зёрнами без учета трения связки круга с обрабатываемым материалом (рис. 3).

Как и в предыдущем случае, отношение  $P_z / P_y$  изменяется в пределах от значения коэффициента трения связки круга с обрабатываемым материалом  $f$  до значения  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$ . Очевидно, коэффициент  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma) < 1$ , поскольку угол  $(\psi + \gamma) > 45^\circ$ . Увеличить значение коэффициента  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$  и соответственно повысить эффективность процесса шлифования, исходя из этого, можно уменьшением угла  $(\psi + \gamma)$  за счет снижения интенсивности трения режущих зерен с обрабатываемым материалом и уменьшения отрицательного переднего угла зерна  $\gamma$ , например, за счет применения режущих зерен из СТМ, обладающих высокой остротой и небольшими отрицательными передними углами (менее  $30^\circ$ ). Кроме того, эти зёрна характеризуются весьма небольшим коэффициентом трения с обрабатываемым материалом. В итоге угол  $(\psi + \gamma)$  может быть уменьшен до  $45^\circ$ , а коэффициент  $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma) \rightarrow 1$ , что подтверждается экспериментальными данными, полученными при алмазном шлифовании [5]. Это позволяет существенно снизить силовую и тепловую напряженность процесса шлифования и повысить качество и производительность обработки (по сравнению с обычным абразивным шлифованием).

Необходимо отметить, что для реализации данного условия следует фактически исключить трение связки круга с обрабатываемым материалом, например, путем применения электроэрозионной или электрохимической правки алмазного круга на металлической связке [5]. В противном случае отношение  $P_z / P_y$  будет принимать относительно небольшие значения, близкие к коэффициенту трения связки круга с обрабатываемым материалом  $f$ , что снижает эффективность обработки и свидетельствует о преобладании в процессе шлифования трения связки круга с обрабатываемым материалом. Повысить качество и производительность обработки при шлифовании можно применением высокопористых, импрегнированных и прерывистых абразивных кругов, алмазных кругов на относительно малопрочных органических и керамических связках, работающих в режиме самозатачивания и т.д.

**Выводы.** Аналитически обоснованы условия снижения силовой напряженности механической обработки на основе повышения коэффициента резания, равного отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания, который при точении зависит от условий трения на передней и задней поверхностях резца, а при шлифовании – от условий трения связки круга с обрабатываемым материалом. Расчетами установлено, что при точении коэффициент резания, как правило, больше единицы, а при шлифовании меньше единицы. Увеличить коэффициент резания при точении можно уменьшением трения на задней поверхности резца, а при шлифовании – уменьшением трения связки круга с обрабатываемым материалом, например, за счет применения синтетических сверхтвердых материалов.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо определить доли энергий резания и трения в общем энергетическом балансе механической обработки лезвийными и абразивными инструментами и разработать практические рекомендации по снижению силовой напряженности механической обработки.

### Информационные источники

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Новіков Ф.В. Фінішна обробка деталей різанням: монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.
4. Новиков Ф. В. Оценка и анализ долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки / Ф. В. Новиков // Резание и инструменты в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. / Под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол. : проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89(101). – С. 117–125.
5. Сошников С. А. Повышение работоспособности алмазных кругов при шлифовании твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями : автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.03.01 "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" / С. А. Сошников. – Тула : Тульский политехн. ин-т, 1984. – 23 с.

**Полянський В. І., к.т.н.**

ТОВ «Імперія металів», м. Харків

#### УМОВИ ЗНИЖЕННЯ СИЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Теоретично обґрунтовано умови зниження силової напруженості механічної обробки, які полягають головним чином в підвищенні коефіцієнта різання, рівного відношенню тангенціальної та радіальної складових сили різання, який залежить від умов тертя на передній і задній поверхнях різця при точінні та від умов тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом при шліфуванні. Теоретично показано, що при точінні коефіцієнт різання може приймати значно більші значення, ніж при шліфуванні. Збільшити коефіцієнт різання при точінні можна зменшенням тертя на задній поверхні різця та застосуванням інструментів із синтетичних надтвердих матеріалів, які характеризуються високою гостротою та низьким коефіцієнтом тертя, а також застосуванням сучасних збірних твердосплавних і керамічних ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями. При шліфуванні основним шляхом підвищення коефіцієнта різання є зниження тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і забезпечення високої гостроти ріжучих зерен, застосовуючи круги з синтетичних надтвердих матеріалів, що працюють в режимі самозагострювання.

**Ключові слова:** механічна обробка, різання, шліфування, тертя, складові сили різання, продуктивність та якість обробки

**Polyansky V. I., Ph.D.**

LLC "Empire of metals", Kharkiv

#### CONDITIONS FOR REDUCING THE POWER TENSION OF MECHANICAL PROCESSING

Theoretically justified are the conditions for reducing the power strength of machining, consisting mainly in increasing the cutting coefficient equal to the ratio of the tangential and radial components of the cutting force and depending on the friction conditions on the front and rear surfaces of the tool when turning and on the conditions of friction of the bundle of a circle with the material being processed during grinding. It is theoretically shown that when turning, the cutting coefficient can take on much larger values than when grinding. Increase the cutting coefficient during turning by reducing the friction on the back surface of the tool and using tools from synthetic superhard materials with high sharpness and low friction, as well as using modern prefabricated carbide and ceramic cutting tools with wear-resistant coatings. When grinding, the main way to increase the cutting coefficient is to reduce the friction of the bundle of the wheel with the material being processed and to ensure high sharpness of the cutting grains, using circles from synthetic superhard materials operating in self-sharpening mode.

**Key words:** machining, cutting, grinding, friction, component cutting forces, productivity and quality of processing

УДК 006.91

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-21>

Сасов О.О., к.т.н., Авер'янов В.С., к.т.н., Шматко Д.З., к.т.н..

Дніпровський державний технічний університет

## УПРАВЛІННЯ РЕЖИМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ПРОЦЕСОМ ЗНОШУВАННЯ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РОЗРІЗАННІ НАВПІЛ ЗНОШЕНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

*В результаті проведеної роботи визначені закономірності зміни режимних параметрів під час розрізання навіпіл зношених автомобільних шин 195/65R15 діаметром 662 мм ріжучим інструментом зі сплаву Р6М5, які забезпечують збільшення стійкості ріжучого інструменту до зносу, собівартість близької до мінімальної та максимальної продуктивності. В якості керуемого процесу розглядається процес зношування задніх поверхонь ріжучого інструменту. Встановлено, що управлінням швидкістю різання та подачею ріжучого інструменту дозволяє змінити швидкість процесу зносу ріжучого інструменту, тобто до збільшення часу роботи ріжучого інструменту. Розраховані та побудовані криві зносу ріжучого інструменту зі сплаву Р6М5 та швидкості його зносу у відповідності з управлінням режимними параметрами при розрізанні навіпіл зношеної автомобільної шини. Вирішення проблеми управління режимними параметрами сприяє підвищенню ефективності механічної обробки різанням та доповнює математичне та інформаційне забезпечення систем автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП) які використовуються під час утилізації зношених автомобільних шин*

**Ключові слова:** режимні параметри, швидкість різання, подача ріжучого інструменту, сили різання, пневматична шина, утилізація шин, швидкість зносу, якість управління.

**Постановка проблеми.** Загальна проблема моделювання, оптимізації процесу різання та управління їм розглянуто в ряді досліджень, наприклад у загальній формі в роботі [1]. В монографії [2] приведені результати досліджень які направлені на конкретизацію загальної проблеми з застосуванням до умов одноінструментної однолезвійної однопозиційної обробки. Так процес різання та зношування інструменту прийнято об'єктом управління та представлено як керований детермінований процес з відомою метою управління досягнення якої можливе завдяки закономірній зміні в часі режимних параметрів. Процес різання зовнішні проявляється як процес зношування ріжучого інструменту, а проблема забезпечення управління режимними параметрами зводиться до математичного опису функції швидкості зношування інструменту, технологічних обмежень, функціоналів якості управління та вибору і адаптації математичних методів оптимізації. Вирішення проблеми управління режимними параметрами сприяє підвищенню ефективності механічної обробки різанням та доповнює математичне та інформаційне забезпечення систем автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП) які використовуються під час утилізації зношених автомобільних шин. Задача пошуку функції, що характеризує швидкість зношування ріжучого інструменту від режимних та інших параметрів для складання співвідношень, що характеризують стан процесу зносу є одною з головних задач по формуванню автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (АС ТПВ), САМ-систем, CASE-систем для розробки та супроводу програмного забезпечення САПР.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел показав відсутність публікацій, які безпосередньо відносяться до проблеми управління режимними параметрами процесу різання зношених пневматичних шин під час їх утилізації, натомість існує низка робіт, які стосуються проблема моделювання, оптимізації процесу різання зношених автомобільних шин. Створенням математичної моделі формування сил різання при розрізанні зношених пневматичних шин навіпіл займалися - Сасов О.О., Корбочка О.М., Коржавін Ю.А., Авер'янов В.С.[3]. Математичним моделюванням процесів різання матеріалів присвячені роботи [4,5,6] за результатами яких була запропонована загальна послідовність розрахунку швидкості зносу ріжучого інструменту при різанні металів. Теоретичні методи розрахунку сил різання для різних видів обробки різанням в узагальненому вигляді знайшла відображення в роботі [4] де проведені експериментальні дослідження підтверджують нелінійний характер впливу зносу ріжучого інструменту на сили різання. Методами оптимізації режимних параметрів лезвійної обробки металів займався С.В. Грубий в роботі [7]. Значною

проблемою є складність математичного моделювання процесу різання шин, оскільки існує велика кількість взаємовпливаючих параметрів ріжучого інструменту і процесу обробки, а також різноманітні властивості шини (пола форма, велика механічна зносостійкість, пружні властивості матеріалу, наявність металічного корду та текстилевих волокон, хімічний склад гуми, тощо), що зумовлює труднощі та нестабільність лезвійної обробки. Саме цим можна пояснити невелику кількість публікації присвячених цьому питанню, та неоднозначність їх висновків.

**Мета роботи.** Визначити закономірності зміни режимних параметрів під час розрізання навпіл зношених автомобільних шин, які забезпечують відповідну зміну швидкості зношування ріжучого інструменту.

**Матеріали досліджень.** Рішення загальних задач управління режимними параметрами розрізання зношених шин навпіл запропоновано знаходити на основі загальних положень математичної теорії оптимальних процесів та теорії управління [8,9]. В якості керуемого процесу розглядається процес зношування задніх поверхонь ріжучого інструменту. Основне завдання оптимального управління – вибір способу управління зі всіх можливих, для якого інтегральний функціонал якості управління приймає найменше значення при одночасному збільшенні фазової координати (лінійного зносу по задній поверхні) від  $h_{z0}$  до  $h_{zmax}$ .

Сформульовану постановку задачі можна представити системою нелінійних диференціальних рівнянь:

- швидкість зношування ріжучого інструменту

$$f_1 = \frac{dx_1}{d\tau} = \frac{dh_z}{d\tau} = \text{Int}(h_{zn}, v_n, s_n, \tau) \Big|_{t_n = \text{const}}; \quad (1)$$

- інтегральний функціонал якості управління

$$x_0 = \int_0^{T_v} f_0(h_{zn}, v_n, s_n, T_v) d\tau = \sum_{j=1}^{N_v} C_{pj} t_{0j} \rightarrow \min \quad (2)$$

де  $h_{zn}$  – лінійний знос по задній поверхні ріжучого інструменту;

$v_n$  – швидкість різання;

$s_n$  – подача ріжучого інструменту;

Int – функція зношування ріжучого інструменту;

$T_v$  – заданий час обробки;

$N_v$  – число точок управління;

$C_{pj}$  – змінна частина собівартості розрізання шини навпіл;

$t_{0uj}$  – крок за часом обробки, який визначає число точок управління.

Функція Гамільтона-Понтрягіна пов'язує цільову функцію (2) та швидкість зношування ріжучого інструменту (1) через парні змінні  $\Psi_0 \Psi_1$ :

$$H = \Psi_{0j} f_0(h_{zn}, v_n, s_n, T_v) + \Psi_{1j} f_1(h_{zn}, v_n, s_n, \tau) \quad (3)$$

У свою чергу, зв'язок парних змінних за точками управління визначена системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{0j}}{dh_z} &= -\frac{1}{f_0} \left( \Psi_{0j} \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_{1j} \frac{df_1}{dh_z} \right); \\ \frac{d\Psi_{1j}}{dh_z} &= -\frac{1}{f_1} \left( \Psi_{0j} \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_{1j} \frac{df_1}{dh_z} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

з початковими значеннями  $\Psi_{00}(h_{z0}) = \Psi_{0n}$ ,  $\Psi_{10}(h_{z0}) = \Psi_{1n}$ .

Частні похідні, що входять до рівняння (4), визначені чисельним диференціюванням другого порядку точності

$$\begin{aligned} \frac{df_0}{dh_z} &= \frac{C_{pj}(v_{optj}, h_{zn} + h) - C_{pj}(v_{optj}, h_{zn} - h)}{2h}; \\ \frac{df_1}{dh_z} &= \frac{\text{Int}(v_{optj}, h_{zn} + h) - \text{int}(v_{optj}, h_{zn} - h)}{2h}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $h$  – дискретне значення зносу, прийняте в процедурах чисельного диференціювання.

Рішення диференціальних рівнянь (4) знайдено в рамках постановки загальної задачі Коші на кінцевій більшості точок управління

$$\begin{aligned} h_{zn} &= h_{z0} + j\Delta_h, j = 0, 1, 2, \dots; \\ h_{z0} &\leq h_{zn} \leq h_{z\max}. \end{aligned} \quad (6)$$

Використано метод Рунге-Кутта четвертого порядку точності, де для знаходження значень змінних чисельним методом в  $(j+1)$ -й точці управління використані значення в  $j$ -й точці.

Рівняння (4) представлено у формі

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{1j}}{dh_z} &= f_{\Psi_1}(h_{zn}, \Psi_{1j}, \Psi_{0j}); \\ \frac{d\Psi_{0j}}{dh_z} &= f_{\Psi_0}(h_{zn}, \Psi_{1j}, \Psi_{0j}). \end{aligned} \quad (7)$$

Значення змінної для наступної точки управління визначено в загальному вигляді як

$$\Psi_{1(0),j+1} = \Psi_{1(0),j} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (8)$$

де значення коефіцієнтів, наприклад для визначення змінної  $\Psi_{1,j+1}$ , складають:

$$\begin{aligned} k_1 &= h_r f_{\Psi_1}(h_{zn}, \Psi_{1j}, \Psi_{0j}); \\ k_2 &= h_r f_{\Psi_1}\left(h_{zn} + \frac{h_r}{2}, \Psi_{1j} + \frac{k_1}{2}, \Psi_{0j}\right); \\ k_3 &= h_r f_{\Psi_1}\left(h_{zn} + \frac{h_r}{2}, \Psi_{1j} + \frac{k_2}{2}, \Psi_{0j}\right); \\ k_4 &= h_r f_{\Psi_1}(h_{zn} + h_r, \Psi_{1j} + k_3, \Psi_{0j}), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $h_r$  – дискретне значення зносу ріжучого інструменту у процедурах Рунге-Кутта.

Аналогічним чином визначили значення змінної  $\Psi_{0,j+1}$ .

Розрахунок значень швидкості різання та подачі в кожній точці управління виконано у відповідності з принципом максимуму Понтрягіна:  $H \rightarrow \max$ . У якості робочого алгоритму прийнята мінімізація функції –  $H$ :

$$f_u = -H \rightarrow \min, \quad (10)$$

де  $H$  – функція Гамільтона-Понтрягіна (3).

Мінімізація функції (10) виконано методом градієнтного спуску зі змінним кроком, який передбачає ітерацію з режимними параметрами, що управляються в кожній точці управління:

$$\begin{aligned} v_{n,i+1} &= v_{ni} - \alpha_{vi} \frac{df_u(v_{ni}, s_{ni})}{dv}; \\ s_{n,i+1} &= s_{ni} - \alpha_{si} \frac{df_u(v_{ni}, s_{ni})}{ds} \end{aligned} \quad (11)$$

Градієнти функції за напрямками визначені методом чисельного диференціювання другого порядку точності:

$$\begin{aligned} \left. \frac{df_u}{dv} \right|_{v_{ni}, s_{ni}} &= \frac{f_u(v_{ni} + dv, s_{ni}) - f_u(v_{ni} - dv, s_{ni})}{2dv}; \\ \left. \frac{df_u}{ds} \right|_{v_{ni}, s_{ni}} &= \frac{f_u(v_{ni}, s_{ni} + ds) - f_u(v_{ni}, s_{ni} - ds)}{2ds}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $dv, ds$  – дискретні значення швидкості та подачі у процедурах чисельного диференціювання.

Умови визначення оптимальних значень швидкості та подачі в кожній точці управління прийнято у вигляді:

$$\begin{aligned} v_{optj} &= v_{n,i+1}; \quad s_{optj} = s_{n,i+1}; \\ f_u(v_{ni}, s_{ni}) - f_u(v_{n,i+1}, s_{n,i+1}) &\leq \varepsilon; \\ v_{\min} &\leq v_{n,i+1} \leq v_{\max}; \quad s_{\min} \leq s_{n,i+1} \leq s_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

з крайовими умовами



$$h_{zn}(0) = h_{z0}; \Psi(0) = (\Psi_{0n}, \Psi_{1n});$$

$$h_{zn}(T_v) = h_{zn}(\tau) \leq h_{zmax}; \Psi(T_v) = [\Psi_0(\tau), \Psi_1(\tau)],$$

де  $\varepsilon$  – мала величина, а ліміти зміни швидкості та подачі  $v_{min}$ ,  $v_{max}$ ,  $s_{min}$ ,  $s_{max}$  обмежені відповідними діапазонами зміни цих параметрів у рівнянні швидкості зносу ріжучого інструменту.

Встановлено, що вибір початкового значення парної змінної  $\Psi_{1n}$  дозволяє змінити швидкість процесу зносу ріжучого інструменту, при цьому зменшення цього значення призводить до зменшення швидкості зношування, тобто до збільшення часу роботи ріжучого інструменту[2]. Підбиранням початкового значення змінної  $\Psi_{1n}$  можна досягти того, що для заданого часу обробки  $T_v$  знос досягне максимально допустимого значення  $h_{zmax}$ .

Параметри управління режимними параметрами розраховані для одноінструментного розрізання зношеної автомобільної шини 195/65R15 діаметром 662 мм ріжучим інструментом зі сплаву Р6М5 з геометричними параметрами: передній кут  $\gamma=20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon=53^\circ$ , задній кут  $\alpha=68^\circ$ . Використані поліноміальні рівняння отримані за експериментальними даними:

- вертикальної складової сили різання  $P_z$  для умов розрізання пневматичних шин навіпіл твердосплавними різцями (12) [3];
- швидкості зносу  $Int$  твердосплавних різців при обробці сталевих заготовок (1.22) [2].

Сили різання для умов розрізання зношених автомобільних шин розраховані по рівнянням приведеним в роботі [3].

Графіки зміни швидкості різання та подачі для трьох варіантів заданого часу розрізання  $T_v = 1; 2; 3$  хвилин приведені на рисунку 1 та 2 відповідно

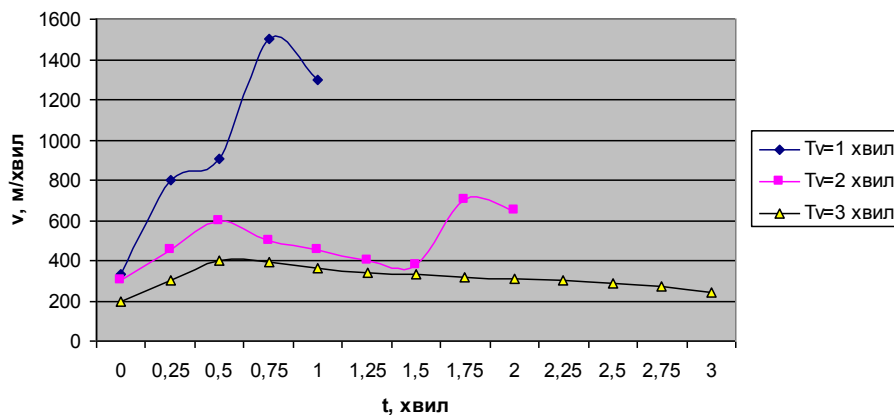


Рис. 1. Управління швидкістю різання  $v$  зношеної автомобільної шини 195/65R15 діаметром 662 мм ріжучим інструментом зі сплаву Р6М5 з геометричними параметрами: передній кут  $\gamma=20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon=53^\circ$ , задній кут  $\alpha=68^\circ$  для заданого часу розрізання

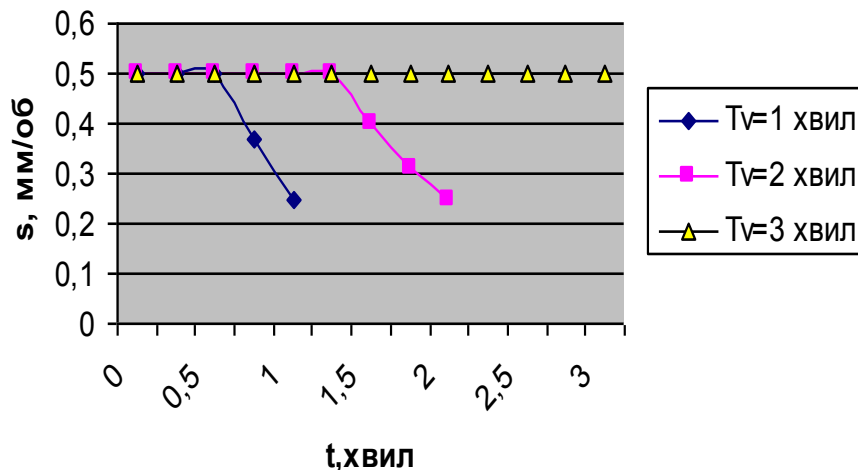


Рис. 2. Управління подачею різання  $s$  зношеної автомобільної шини 195/65R15 діаметром 662 мм ріжучим інструментом зі сплаву Р6М5 з геометричними параметрами: передній кут  $\gamma=20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon=53^\circ$ , задній кут  $\alpha=68^\circ$  для заданого часу розрізання

Розрахункові криві зносу ріжучого інструменту зі сплаву Р6М5 та швидкості його зносу у відповідності з управлінням режимними параметрами (рис.1 та 2) при розрізанні навпіл зношеної автомобільної шини 195/65R15 приведені на рисунках 3 та 4 відповідно.

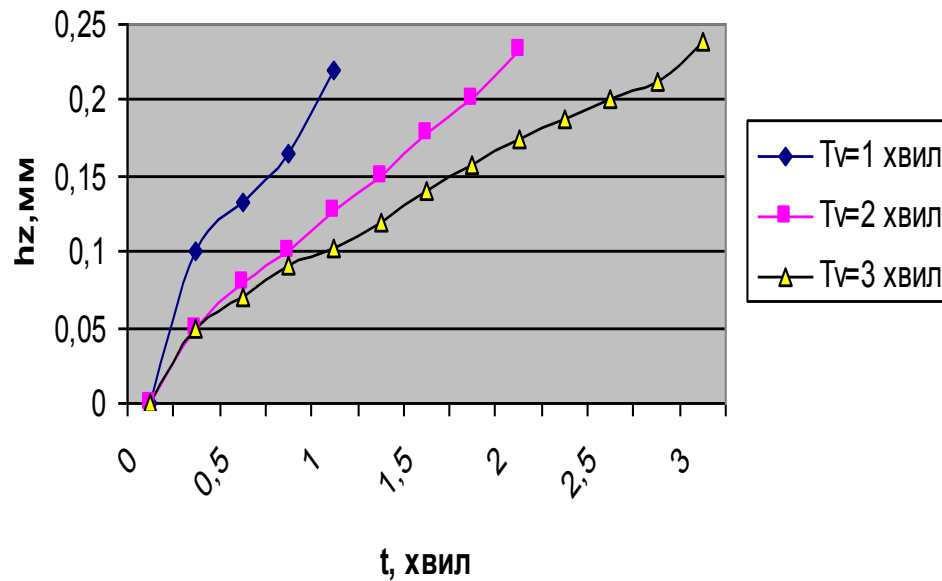


Рис. 3. Розрахункові криві зносу  $h_z$  ріжучого інструменту зі сплаву Р6М5 у відповідності з управлінням режимними параметрами при розрізанні навпіл зношеної автомобільної шини 195/65R15

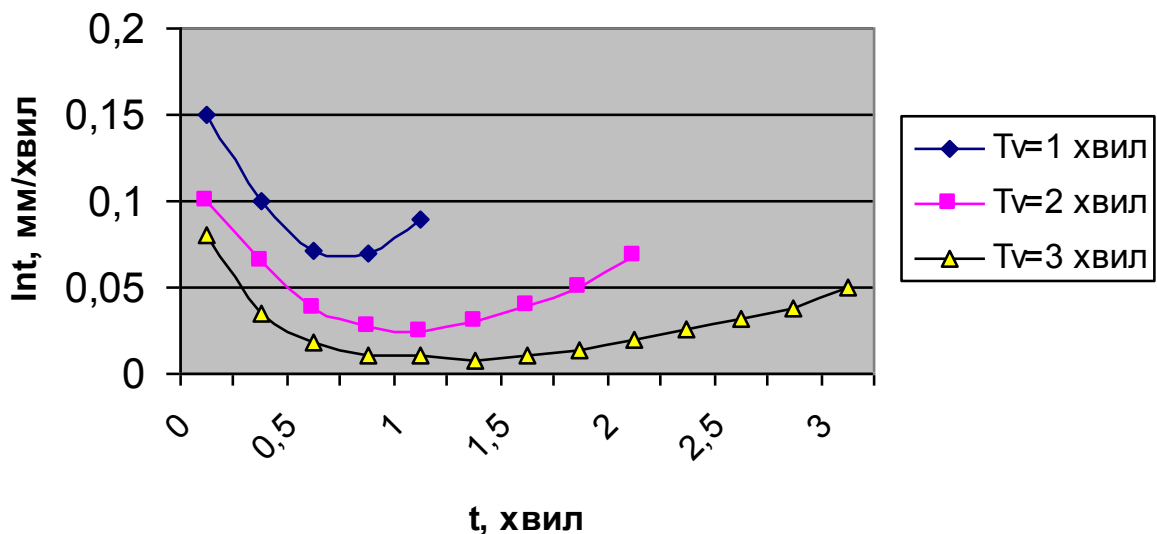


Рис. 4. Розрахункові криві швидкості зносу  $Int$  ріжучого інструменту зі сплаву Р6М5 у відповідності з управлінням режимними параметрами при розрізанні навпіл зношеної автомобільної шини 195/65R15

Графіки, що характеризують зміну режимних параметрів від часу (рис.1 та рис. 2) мають змінний характер, як і швидкість зносу інструменту (рис.4). На кривих зносу фактично відсутні ділянки з постійною швидкістю зносу ріжучого інструменту. Такий процес зносу характерний для інструменту, який оснащений змінними багатогранними пластинами з твердих сплавів.

**Висновки.** Встановлено, що зміна швидкості та подачі ріжучого інструменту впливає на його швидкість зносу. В результаті проведеної роботи визначені закономірності зміни режимних параметрів під час розрізання навпіл зношених автомобільних шин 195/65R15 діаметром 662 мм ріжучим інструментом зі сплаву Р6М5 з геометричними параметрами: передній кут  $\gamma=20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon=53^\circ$ , задній кут  $\alpha=68^\circ$ . Розраховані режимні параметри

які забезпечують збільшення стійкості ріжучого інструменту до зносу, собівартість близької до мінімальної та максимальної продуктивності.

#### Інформаційні джерела

1. Петрушин С.И., Грубый С.В. Обработка чугунок и сталей сборными резцами со сменными многогранными пластинами. Томск: ТПУ, 2000. 156 с.
2. Оптимизация процесса механической обработки и управления режимными параметрами / С.В. Грубый. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 с.
3. Sasov A. Study of energy efficiency of the processes of mechanical destruction of worn automobile tires. A.Sasov, A. Korobochka, V. Averyanov, Iu. Korzhavin.// Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. Kharkiv. 6/1 (90) 2017. – P.51-60..
4. Розенберг Ю.А. Резания материалов: учеб. для техн. вузов. Курган: ОАО «Полиграф. Комбінат «Зауралье», 2007. 294 с.
5. Верещак А.С., Кушнер В.С. Резания материалов: учеб. М.: Высш. Шк., 2009. 535 с.
6. Грубый С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 107 с.
7. Грубый С.В. Методы оптимизации режимных параметров лезвийной обработки: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 96 с.
8. Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. . М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 487 с.
9. Математическая теория оптимальных процессов /Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. М.: Наука, 1983. 392 с.

УДК 006.91

**Сасов А.А.**, к.т.н., **Аверьянов В.С.**, к.т.н., **Шматко Д.З.**, к.т.н.,  
Днепропетровский государственный технический университет

#### УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ И ПРОЦЕССОМ ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РАЗРЕЗАНИИ ПОПОЛАМ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

*В результате проведенной работы определены закономерности изменения режимных параметров при разрезании пополам изношенных автомобильных шин 195 / 65R15 диаметром 662 мм режущим инструментом из сплава Р6М5, которые обеспечивают увеличение стойкости режущего инструмента к износу, себестоимость близкой к минимальной и максимальную производительность. В качестве управляемого процесса рассматривается процесс износа задних поверхностей режущего инструмента. Установлено, что управлением скоростью резания и подачей режущего инструмента позволяет изменить скорость процесса износа режущего инструмента, то есть к увеличению времени работы режущего инструмента. Рассчитаны кривые износа режущего инструмента из сплава Р6М5 и скорости его износа в соответствии с управлением режимными параметрами при разрезании пополам изношенной автомобильной шины. Решение проблемы управления режимными параметрами способствует повышению эффективности механической обработки резанием и дополняет математическое и информационное обеспечение систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) которые используются при утилизации изношенных автомобильных шин*

**Ключевые слова:** режимные параметры, скорость резания, подача режущего инструмента, силы резания, пневматическая шина, утилизация шин, скорость износа, качество управления.

UDC 006.91

**Sasov A.A.**, c.t.s., **Averianov V.S.**, c.t.s., **Shmatko D.Z.** c.t.s.,  
Dneprovskiy State Technical University, Kamenskoye, Ukraine

#### MANAGEMENT OF MODE PARAMETERS AND THE PROCESS OF WEARING THE CUTTING TOOL WHEN CUTTING THE AMOUNT OF WRONTED AUTOMOBILE TIRES

*As a result of this work, regularities of changes in operating parameters are determined when cutting worn out car tires 195 / 65R15 with a diameter of 662 mm with a cutting tool made of R6M5 alloy, which provide an increase in the wear resistance of the cutting tool, cost value close to the minimum and maximum performance. The process of wear of the back surfaces of the cutting tool is considered as a controlled process. It has been established that by controlling the cutting speed and the feed of the cutting tool, it is possible to change the speed of the wear process of the cutting tool, that is, to increase the operating time of the cutting tool. Calculated wear curves of the cutting tool from alloy R6M5 and its wear rate in accordance with the control of operating parameters when cutting a worn out car tire in half. Solving the problem of managing regime parameters improves the efficiency of mechanical machining and complements the mathematical and informational support of computer-aided design of technological processes used for recycling used tires*

**Key words:** *regime parameters, cutting speed, cutting tool feed, cutting forces, pneumatic tire, tire utilization, wear rate, control quality.*

УДК 621.9.048

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-22>

Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ХАОТИЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ВІБРОБУНКЕРА

*В статті розглянуто результати досліджень високочастотних хаотичних вібраційних переміщень елементів робочого середовища (гранул абразиву). Встановлено, що на елемент робочого середовища (деталь або гранулу), який знаходиться у вібробункері, діють постійні вібраційні навантаження з частотою, рівною частоті зміни сили електромагніта, які передаються з боку гранул абразиву на деталь і навпаки. Одночасно на деталь діють ударні навантаження. Для цього складена динамічна модель вібраційного руху окремої гранули, яка подана у вигляді трьох поступальних парціальних динамічних підсистем. Складені їх диференціальні рівняння і знайдено імпульсні характеристики окремої гранули, що включають переміщення гранули під дією ударного навантаження. Загальне переміщення гранули знайдено як суперпозиція переміщення від окремих імпульсних навантажень у вигляді набору ударних імпульсів. Встановлено, що основою робочого процесу віброабразивної обробки є процес взаємодії деталі і гранул при ударному навантаженні вібробункера. Інтенсивність обробки деталі залежить від її випадкового положення в момент удару.*

**Ключові слова:** вібраційна обробка, вібробункер, гранула, абразив, циркуляційний рух, траєкторія, імпульс, навантаження, електромагніт.

**Постановка проблеми.** До фінішних методів відноситься і вібраційна обробка деталей в різноманітних середовищах, яка забезпечує створення необхідної шорсткості і фізико-механічних властивостей поверхні та поверхневих шарів [1]. На процес вібраційної обробки деталей вільними абразивами мають вплив конструкція деталі, її форма, вага, матеріал, фізико-хімічний склад поверхневого шару, вимоги до обробленої деталі, матеріал абразиву, його зернистість, режими обробки тощо.

Інтенсивність вібраційної обробки залежить від режимів і часу обробки, характеристики і розмірів частинок робочого середовища, механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей тощо. До числа основних параметрів даного процесу відносяться: характер руху робочої камери і частинок робочого середовища, їх швидкість і пришвидшення, сила мікроударів, контактні тиски, температура, яка виникає в зоні дії мікроударів, середня температура в робочій камері. На швидкість руху робочого середовища впливає амплітуда і частота коливань. Із їх збільшенням швидкість циркуляції робочого середовища зростає. На швидкість циркуляції дещо менший вплив має кількість і характер рідинного розчину, грануляція і форма частинок робочого середовища, заповнений об'єм робочої камери [2].

Тому дослідження процесу взаємодії деталі і гранул при ударному навантаженні вібробункера при вібраційній обробці є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Повільний циркуляційний рух робочого середовища при вібраційній обробці полягає у переміщенні елементів. Елементи робочого середовища мають розміри, які є порівняними із розмірами вібробункера. Тому усереднені траєкторії руху робочого середовища не є плавними лініями. Як правило, вони є ламаними, тому що при переміщенні деталей і гранул абразиву вони контактують у різних точках і розташування точок контакту змінюється [3, 4].

Додатково кожний елемент робочого середовища переміщується відносно сусідніх елементів. Цей рух вже не є повільним. Для гранул абразиву відносно переміщення являє собою деякий вібраційний рух. Він аналогічний броунівському руху твердих частинок у рідині або газі. Цей рух є незалежним від гравітаційних сил та ударно-імпульсних навантажень. Вібраційний рух залежить від розміру і маси елементів робочого середовища. Вібраційний рух є швидким. Елементи робочого середовища мають швидкі переміщення, але ці переміщення є обмеженими. Елементи переміщуються на невелику висоту. Наявність вібраційного руху приводить до зміни траєкторій руху гранул абразиву та деталей. Вібраційний рух окремих гранул усереднюється. Усереднений рух відповідає повільному циркуляційному руху робочого середовища [5, 6].

**Мета роботи.** Встановлення основних закономірностей повільного циркуляційного руху робочого середовища та визначення впливу параметрів вібробункера на процес ударно-імпульсної обробки.

**Викладення основного матеріалу.** На елемент робочого середовища (деталь або гранулу), який знаходиться у вібробункері, діють постійні вібраційні навантаження з частотою, рівною частоті зміни сили електромагніта. Вібраційні навантаження передаються з боку гранул абразиву на деталь і навпаки. Одночасно на деталь діють ударні навантаження. Під дією всього комплексу навантажень деталі і гранули абразиву рухаються в робочому середовищі. Для видовжених деталей та гранул абразиву поперечно-кутові переміщення під дією ударних навантажень є незначними. Тому прийнята динамічна модель вібраційного руху окремої деталі або гранули абразиву у вигляді тіла, що здійснює поступальний рух (рис. 1).

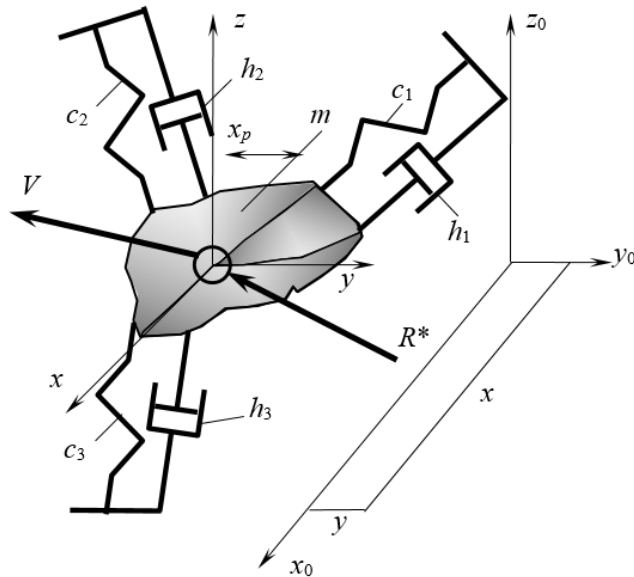


Рис. 1. Загальна динамічна модель вібраційного руху деталі або гранули абразиву під дією вібраційних навантажень

Динамічна модель відповідає просторовому поступальному руху твердого тіла із пружно-дисипативними зв'язками. На гранулу абразиву або деталь постійно діють вібраційні навантаження  $R^*$ . Прийнято, що вони мають вигляд квазістаціонарних випадкових процесів. Загальна динамічна модель подана у вигляді трьох парціальних динамічних підсистем (рис. 2).

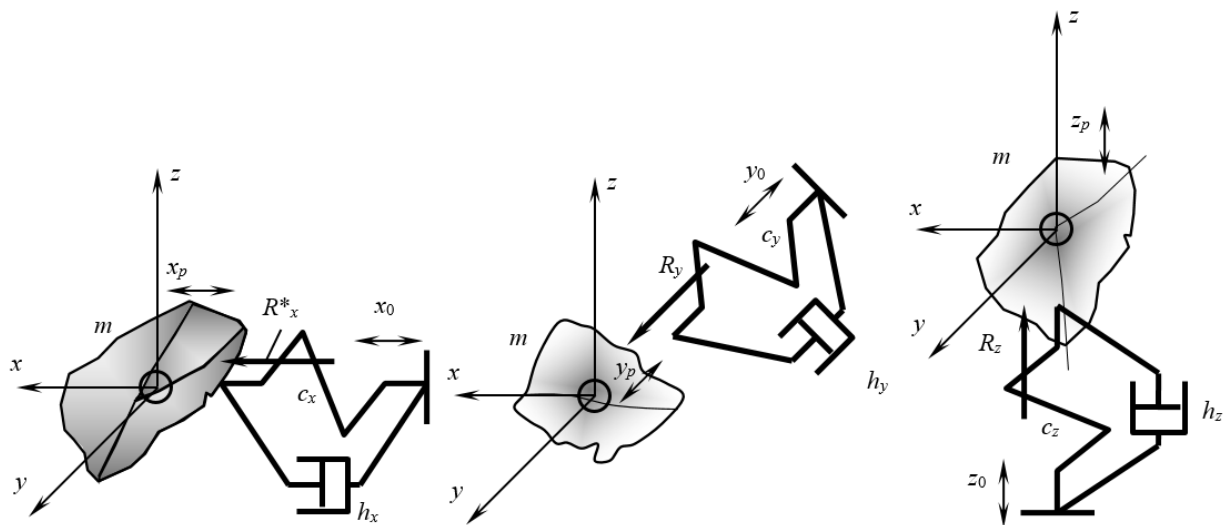


Рис. 2. Парціальні динамічні підсистеми переміщення окремої гранули абразиву при її хаотичному вібраційному русі

Рівняння, що описують переміщення гранули в проекціях на осі координат:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + h_x\dot{x} + c_x x = R_x^*, \\ m\ddot{y} + h_y\dot{y} + c_y y = R_y^*, \\ m\ddot{z} + h_z\dot{z} + c_z z = R_z^*, \end{cases} \quad (1)$$

$m$  – інерційний коефіцієнт (маса гранули);  $h_x, h_y, h_z$  – дисипативні коефіцієнти, що визначають еквівалентну пружну взаємодію елемента із іншими елементами робочого середовища;  $c_x, c_y, c_z$  – деформативні коефіцієнти;  $R_x, R_y, R_z$  – проекції випадкових вібраційних сил, що діють на гранулу.

Для розв'язку даної системи рівнянь використані часові (перехідні) характеристики системи. Перехідна функція  $H(t)$  та імпульсна характеристика  $\omega(t)$ . Вони являють собою переміщення гранули під дією ступінчатої сили  $R_x^* = R_{0x}(t)$  та під дією імпульсного навантаження у вигляді  $\delta$ -функції.

Переміщення гранули під дією ступінчатих сил (перехідні функції) визначено залежностями:

$$\begin{aligned} x(t) &= K_x + \frac{\sqrt{T_x^2 V_{0x}^2 + 2\xi_x T_x V_{0x} (X_0 - K_x) + (X_0 - K_x)^2}}{\sqrt{1 - \xi_x^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_x}{T_x} t} \times \\ &\times \sin \left[ \frac{\sqrt{1 - \xi_x^2}}{T_x} \cdot t + \arctg \left( \frac{\sqrt{1 - \xi_x^2}}{\xi_x + \frac{T_x V_{0x}}{X_0 - K_x}} \right) \right], \\ y(t) &= K_y + \frac{\sqrt{T_y^2 V_{0y}^2 + 2\xi_y T_y V_{0y} (Y_0 - K_y) + (Y_0 - K_y)^2}}{\sqrt{1 - \xi_y^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_y}{T_y} t} \times \\ &\times \sin \left[ \frac{\sqrt{1 - \xi_y^2}}{T_y} \cdot t + \arctg \left( \frac{\sqrt{1 - \xi_y^2}}{\xi_y + \frac{T_y V_{0y}}{Y_0 - K_y}} \right) \right], \\ z(t) &= K_z + \frac{\sqrt{T_z^2 V_{0z}^2 + 2\xi_z T_z V_{0z} (Z_0 - K_z) + (Z_0 - K_z)^2}}{\sqrt{1 - \xi_z^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_z}{T_z} t} \times \\ &\times \sin \left[ \frac{\sqrt{1 - \xi_z^2}}{T_z} \cdot t + \arctg \left( \frac{\sqrt{1 - \xi_z^2}}{\xi_z + \frac{T_z V_{0z}}{X_0 - K_z}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $V_{0x}, V_{0y}, V_{0z}$  – початкові значення проекцій швидкості;  $X_0, Y_0, Z_0$  – початкові координати гранули.

Коефіцієнти, які входять в (2) визначені через параметри динамічної моделі згідно формул:

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{R_{0x}}{c_x}, T_x = \sqrt{\frac{m}{c_x}}, \xi_x = \frac{h_x}{2\sqrt{m c_x}}; \\ K_y &= \frac{R_{0y}}{c_y}, T_y = \sqrt{\frac{m}{c_y}}, \xi_y = \frac{h_y}{2\sqrt{m c_y}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{R_{0z}}{c_z}, T_z = \sqrt{\frac{m}{c_z}}, \xi_z = \frac{h_z}{2\sqrt{mc_z}};$$

Для нульових початкових умов  $X_0 = V_{0x} = 0$ ,  $Y_0 = V_{0y} = 0$ ,  $Z_0 = V_{0z} = 0$ :

$$\begin{aligned} X(t) &= K_x \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi_x^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_x t}{T_x}} \cdot \sin \left[ \frac{\sqrt{1-\xi_x^2}}{T_x} \cdot t + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\xi_x^2} - 1} \right] \right\}, \\ Y(t) &= K_y \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi_y^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_y t}{T_y}} \cdot \sin \left[ \frac{\sqrt{1-\xi_y^2}}{T_y} \cdot t + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\xi_y^2} - 1} \right] \right\}, \\ Z(t) &= K_z \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi_z^2}} \cdot e^{-\frac{\xi_z t}{T_z}} \cdot \sin \left[ \frac{\sqrt{1-\xi_z^2}}{T_z} \cdot t + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\xi_z^2} - 1} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Імпульсні характеристики визначають рух гранули під дією імпульсних (ударних) навантажень.

Імпульсні характеристики знаходяться шляхом диференціювання залежностей (4).

$$\begin{aligned} w_x(t) &= K_x \cdot \left( \frac{\cos \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_x^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_x^2}}{T_x} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_x}{T_x}}}{T_x} - \frac{\xi_x \sin \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_x^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_x^2}}{T_x} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_x}{T_x}}}{T_x \sqrt{1-\xi_x^2}} \right), \\ w_y(t) &= K_y \cdot \left( \frac{\cos \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_y^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_y^2}}{T_y} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_y}{T_y}}}{T_y} - \frac{\xi_y \sin \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_y^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_y^2}}{T_y} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_y}{T_y}}}{T_y \sqrt{1-\xi_y^2}} \right), \\ w_z(t) &= K_z \cdot \left( \frac{\cos \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_z^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_z^2}}{T_z} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_z}{T_z}}}{T_z} - \frac{\xi_z \sin \left( \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_z^2} - 1} \right) + \frac{t\sqrt{1-\xi_z^2}}{T_z} \right) \cdot e^{-\frac{t\xi_z}{T_z}}}{T_z \sqrt{1-\xi_z^2}} \right). \end{aligned}$$

Вібраційні навантаження на деталь являють собою набір ударних імпульсів. Їх можна подати у вигляді ряду складеного із  $\delta$ -функцій, які діють з частотою 50 Гц (частота зміни сили на електромагніті). Відповідно

$$R_x = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \delta(t - i\tau),$$

де,  $a_i$  – випадкова інтенсивність ударного імпульсу;  $\tau = 1/50$  – період зміни сили електромагніту;  $\delta(t - i\tau)$  – дельта-функція Дірака, яка діє в момент часу  $t_i = i\tau$ .

При дії кожного із імпульсів на деталь, вона переміщується у відповідності із своєю імпульсною характеристикою:

$$w_i(t) = w(t - i\tau) \cdot 1(t - i\tau).$$

При дії пакету імпульсів переміщення деталі визначається рядами:



$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot 1(t-i\tau) \cdot \frac{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_x^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_x^2}}{T_x}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_x}{T_x}}}{T_x} - \frac{\xi_x \sin\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_x^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_x^2}}{T_x}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_x}{T_x}}}{T_x \sqrt{1-\xi_x^2}},$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot 1(t-i\tau) \cdot \frac{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_y^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_y^2}}{T_y}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_y}{T_y}}}{T_y} - \frac{\xi_y \sin\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_y^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_y^2}}{T_y}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_y}{T_y}}}{T_y \sqrt{1-\xi_y^2}},$$

$$z(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_z \cdot 1(t-i\tau) \cdot \frac{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_z^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_z^2}}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_z}{T_z}}}{T_z} - \frac{\xi_z \sin\left(\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{1}{\xi_z^2}-1}\right) + \frac{(t-i\tau)\sqrt{1-\xi_z^2}}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{(t-i\tau)\xi_z}{T_z}}}{T_z \sqrt{1-\xi_z^2}}.$$

Наведені залежності послужили основою для розрахунку хаотичного руху гранул абразиву в робочому середовищі. Вібратійне навантаження приводить до хаотичного руху, який направлений від дна вібробункера до його поверхні (рис. 3).

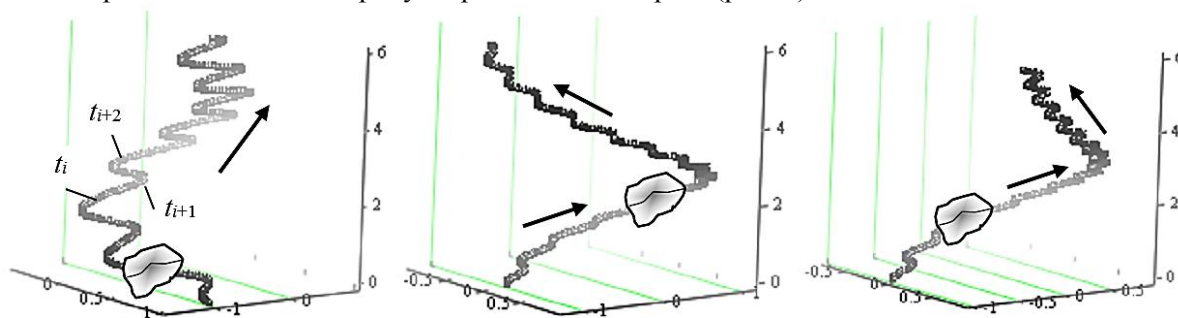


Рис. 3. Типові просторові переміщення гранули абразиву, обумовлені вібраторними імпульсними навантаженнями

Вібратійне навантаження, яке діє з частотою 50 Гц, приводить до зміни положення гранул абразиву. Наведені на рис. 3 траєкторії відповідають проміжкам часу 0,4...0,6 с. За цей час переміщення гранули абразиву по вертикалі склали близько 6 мм. Зміщення по горизонталі не перевищували 1...2 мм. Гранули абразиву здійснюють зигзагоподібний рух з розмахом 0,1...0,3 мм. Найявна стійка тенденція руху гранули абразиву вгору. Це пояснюється витискаючою дією деталей, що рухаються вниз за рахунок різниці гравітаційних сил, що діють на деталь і гранулу.

Траєкторія руху гранули під дією імпульсних навантажень може бути досить складною. Окремі імпульси, що діють з частотою 50 Гц в ряді випадків згладжуються і вібраційний рух характеризується плавною траєкторією переміщення гранули (рис. 4).

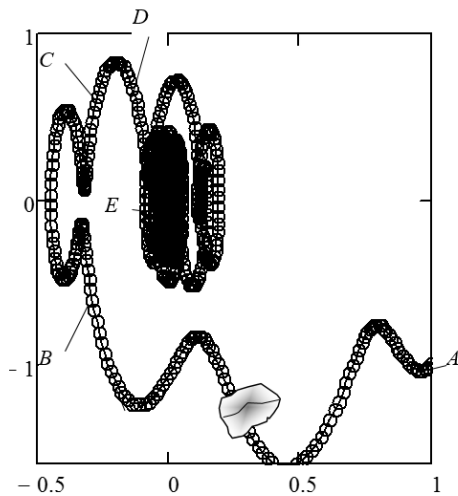


Рис. 4. Переміщення гранули абразиву внаслідок вібраційного руху робочого середовища

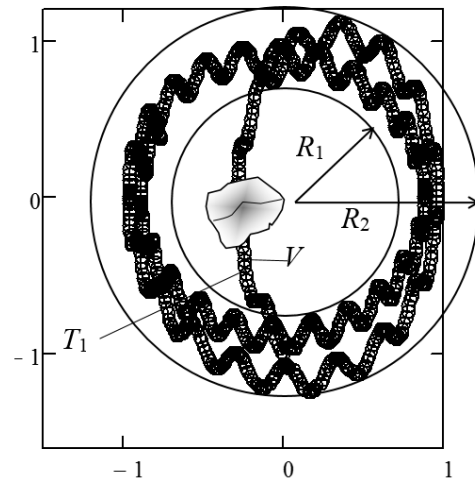


Рис. 5. Траєкторія переміщення гранул абразиву, що одночасно приймають участь у повільному циркуляційному русі та здійснюють вібраційний рух під дією імпульсних ударних навантажень

Плавно змінна траєкторія в залежності від умов імпульсного навантаження набуває різного вигляду. Ділянка *AB* близька до синусоїдальної траєкторії. Ділянка *BC* характеризується циклічною зміною превалюючого напрямку руху гранули. Ділянка *DE* відповідає траєкторії із фокусом, де віброшвидкість гранули становиться близькою до нуля.

У віробункері відбувається повільний циркуляційний рух робочого середовища, обумовлений просторовим рухом корпусу віробункера, гідроударними явищами в робочому середовищі та іншими факторами.

Для встановлення взаємозв'язку повільного циркуляційного руху та хаотичного вібраційного руху гранул проведено розрахунок переміщення гранули, яка приймає участь у повільному русі і додатково рухається під дією ударних імпульсних навантажень з боку інших гранул. Прийнято, що траєкторії повільного циркуляційного руху близькі до кола, як це має місце на периферії робочого середовища. Вібраційний рух приводить до відхилення траєкторії повільного руху від колової (рис. 5).

Інтенсивний циркуляційний повільний рух робочого середовища стабілізує вібраційний рух і знижує його інтенсивність. Амплітудні значення вібраційного руху не перевищують 10...20% від діаметра колової траєкторії повільно циркулюючого руху. Вібраційний рух впливає на повільний циркуляційний рух, змінюючи його траєкторію. Як правило, траєкторія зміщується в просторі, незначним чином змінюючи свою форму. Для кільцевої траєкторії, яка формується на периферії віробункера, наявність вібраційного руху гранул змінює траєкторію по висоті віробункера і вона набуває вигляду колової гвинтової лінії (рис. 6).

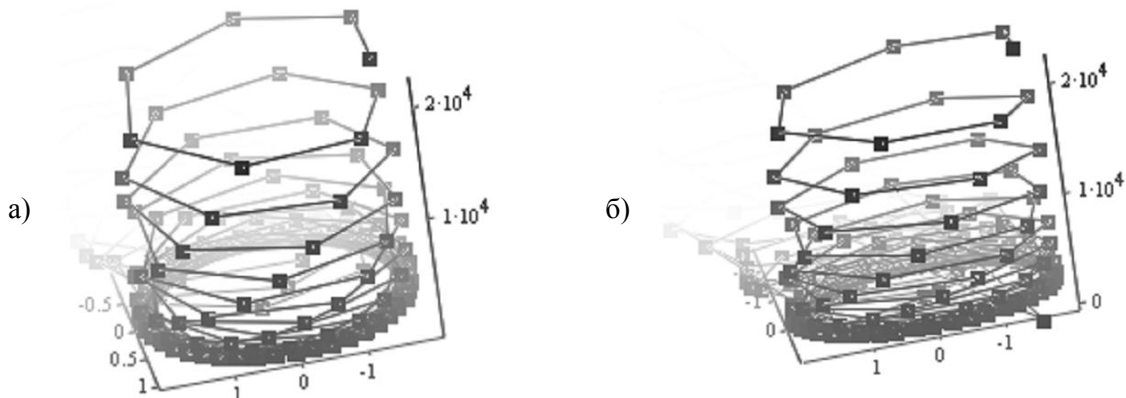


Рис. 6. Характер зміни кільцевої траєкторії циркуляційного руху під дією вібраційного руху

окремих гранул абразиву: а – гранули абразиву, б – деталі

Крок гвинтової лінії є нерегулярним і залежить від багаточисельних факторів випадкового характеру. Якщо інтенсивність циркуляційного руху знижується, вібраційний рух гранул інтенсифікується. Це проявляється у впливі на траєкторію повільного руху. Вона викривляється, набуваючи складної форми (рис. 7).

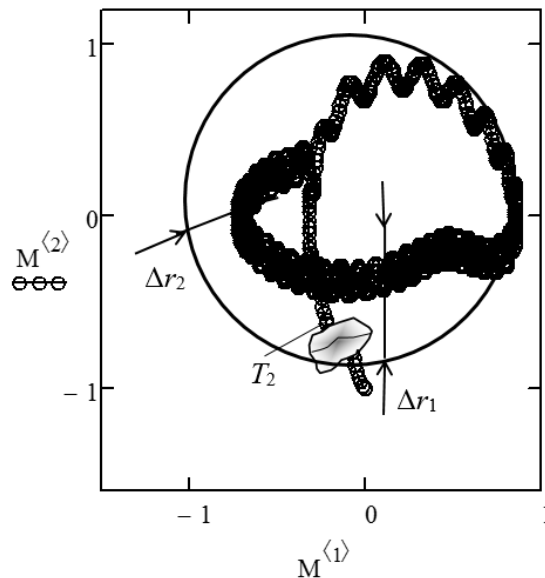


Рис. 7. Переміщення гранули абразиву, який приймає участь у вібраційному русі та повільному циркуляційному русі низької інтенсивності

Зміни траєкторії гранули проявляються у відхиленні її форми від колової. Радіальне відхилення траєкторії від кола змінюється в широких межах. Різниця відхилень  $\Delta r_1 - \Delta r_2$  є порівнянною із радіусом колової траєкторії. Має місце зміна частоти вібрацій коливаний та площини її дії.

Гранула абразиву, яка за деякими причинами набула значення вібраційного витіснення за межі усталеного циркуляційного руху і рухається незалежно, як правило, по траєкторії, що мало відрізняється від прямої лінії. Це простежується на рис. 5, 7, де наявні ділянки  $T_1$ ,  $T_2$  з рухом гранули абразиву, близьким до прямолінійного.

**Висновки.** В результаті досліджень встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. В робочому середовищі має місце хаотичний рух окремих елементів (гранул абразиву), який обумовлений ударними навантаженнями на гранулу з боку сусідніх гранул. Хаотичний рух проявляється у вигляді відхилень траєкторії руху окремої гранули від середньої траєкторії циркуляційного руху. Відхилення траєкторії близьке до гармонічного (синусоїдального) закону. Обробка деталі в основному здійснюється при відносному переміщенні деталі відносно гранул абразиву при ударі вібробункера. Швидкість переміщення деталі відносно гранул залежить від випадкового положення деталі відносно напрямку вектора швидкості деталі при ударі.

#### Інформаційні джерела

1. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
2. Струтинський В.Б. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк – Луцьк: СПД Гадак Жанна Володимирівна друкарня "Волиньполіграф"<sup>TM</sup>, 2016. – 139 с.
3. Струтинський В.Б. Дослідження закономірностей повільного циркуляційного вихрового руху робочого середовища у вібробункері / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк / «Перспективні технології та прилади». Збірник статей. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 176–185.
4. Симонюк В.П. Дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В.

Красовський / «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. Випуск 12. м. Луцьк, червень 2018 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – С. 143–149.

5. Симонюк В.П. Математичне моделювання циркуляційного руху вібробункера / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В. Красовський / Технічні вісті: науковий часопис, 2018/1(47), 2(48). – С. 63 – 66.

6. V. Symonyuk Experimental study of circulating vortex movement working environment in vibrobunker / V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 12, September 2017, Pages 41-54, DOI 10.2412/mmse.58.82.178 provided by.

**Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С. к.т.н.,**  
Луцький національний технічний університет

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ВИБРОБУНКЕРА**

*В статье рассмотрены результаты исследований высокочастотных хаотических вибрационных перемещений элементов рабочей среды (гранул абразива). Установлено, что на элемент рабочей среды (деталь или гранулу), который находится в вибробункере, действуют постоянные вибрационные нагрузки с частотой, равной частоте изменения силы электромагнита, которые передаются со стороны гранул абразива на деталь и наоборот. Одновременно на деталь действуют ударные нагрузки. Для этого составлена динамическая модель вибрационного движения отдельной гранулы, которая представлена в виде трех поступательных парциальных динамических подсистем. Составленные их дифференциальные уравнения и найдено импульсные характеристики отдельной гранулы, включающие перемещение гранулы под действием ударной нагрузки. Общее перемещение гранулы найдено как суперпозиция перемещения от отдельных импульсных нагрузок в виде набора ударных импульсов. Установлено, что основой рабочего процесса виброабразивной обработки является процесс взаимодействия детали и гранул при ударной нагрузке вибробункера. Интенсивность обработки детали зависит от ее случайного положения в момент удара.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, вибробункер, гранула, абразив, циркуляционный движение, траектория, импульс, нагрузка, электромагнит.*

**V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko**

Lutsk National Technical University

#### **RESEARCH OF HIGH-FREQUENCY CHAOTIC VIBRANCES OF THE WORKING ENVIRONMENT OF VIBROBUNKER**

*In the article the results of researches of high-frequency chaotic vibrational displacements of elements of a working medium (abrasive granules) are considered. It has been established that on the element of a working medium (a part or a granule) that is in a vibrator bunker, there are constant vibration loads with a frequency equal to the frequency of the change in the strength of the electromagnet, which are transmitted from the granule of the abrasive to the part and vice versa. At the same time there is a shock load on the part. For this purpose, a dynamic model of vibration motion of a separate granule is presented, which is presented as three translational partial dynamic subsystems. Their differential equations are constructed and impulse characteristics of a separate granule are found, which include the movement of the granule under the action of the shock load. The general displacement of the granule was found as a superposition of displacement from individual pulsed loads in the form of a set of shock impulses. It was established that the basis of the working process of vibration abrasive treatment is the process of interaction of the parts and granules under the shock loading of the vibrator bunker. The intensity of processing the part depends on its random position at the time of impact.*

**Keywords:** *vibration treatment, vibrator bunker, granule, abrasive, circulation motion, trajectory, pulse, load, electromagnet.*

УДК 622.232

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-23>

Стасюк В.М.

Луцький національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ФАЗИ ФОРМУВАННЯ РУШІЙНОГО ІМПУЛЬСУ ПНЕВМОПРИВОДА З МЕХАНІЧНИМ ЗВ'ЯЗКОМ МІЖ ПОРШНЕМ-УДАРНИКОМ ТА СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ

*Пневмоприводи характеризуються вищою надійністю порівняно з іншими типами приводів під час експлуатації в несприятливих умовах. Однак стиснене повітря є досить дорогим енергоносієм. Тому завдання здешевлення експлуатації пневматичних машин набуло на сьогодні особливої актуальності. Ефективним шляхом його вирішення є ґрунтований аналіз робочих циклів приводів з метою виявлення фаз, енергоємність яких найвища, та пошук конструктивних рішень щодо її зменшення.*

*Об'єктом дослідження служить пневмопривод ударних машин із механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування. У роботі досліджено фазу наповнення камери робочого ходу цього приводу як таку, що чинить визначальний вплив на формування енергетичних характеристик ударної машини і безпосередньо пов'язана із витратами стисненого повітря. Фазу розглянуто розподіленою на початковий та завершальний етапи, на яких здійснюється формування рушійного імпульсу для виникнення руху поршня-ударника.*

*Виконано детальний аналіз початкового етапу, розроблено його математичну модель, яку варто використовувати при проектуванні енергоощадних конструкцій пневматичних приводів розгляданого типу. Її використання дозволить полегшити виконання завдання щодо отримання заданих енергетичних характеристик і швидкодії ударної машини та вибору потрібних для цього раціональних величин конструктивних параметрів приводу при оптимальних витратах стисненого повітря.*

**Ключові слова:** пневмопривод, поршень-ударник, фаза, початковий етап, математична модель.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Пневматичні приводи відомі в науці та техніці як найбільш надійні серед інших видів приводів під час експлуатації машин та механізмів на їх основі в умовах несприятливих або агресивних середовищ. Зокрема, це стосується пневматичних машин з приводами, виконавчі органи яких здійснюють вібраційний або ударний вплив на відповідний об'єкт. Однак собівартість стисненого повітря досить висока. Тому на сьогоднішній день актуалізувалося завдання проведення якомога глибших досліджень пневматичних приводів, спрямованих на зменшення їх енергоспоживання. Щодо пневмоприводів ударних машин, то для досягнення цього завдання доцільно виконувати детальний аналіз їх робочих циклів, виокремлювати та досліджувати ті фази, які істотно впливають на витрати стисненого повітря, за можливості регулювати їх протікання шляхом оптимізації розмірів конструктивних параметрів пневмоциліндра, поршня-ударника, інших складових приводу, однак забезпечуючи при цьому отримання заданих енергетичних показників ударної машини та потрібну її швидкість. Зокрема, це стосується також пневматичних приводів із механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування, фази наповнення якого досить енергоємні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми.** Глибоким дослідженням пневматичних приводів присвячені роботи [1; 2] та інші. Однак в них, як і в наукових публікаціях вітчизняних та зарубіжних науковців, результатів фазних досліджень робочих циклів пневмоприводів із механічним зв'язком між поршнем-ударником і системою керування, присвячених зменшенню споживання стисненого повітря, не виявлено.

**Постановка завдання:** дослідити початковий етап фази формування рушійного імпульсу пневмопривода із механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування як такий, що чинить визначальний вплив на формування енергетичних характеристик ударної машини (сили та енергії удару) та її швидкодії і безпосередньо пов'язаний із витратами енергоносія – стисненого повітря шляхом складання математичної моделі, яку можна буде використовувати при створенні нових конструкцій пневматичних приводів із таким самим чи

подібним принципом дії, зорієнтованих на оптимізацію чи мінімізацію витрат стисненого повітря.

У приводах з механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування фазами, які безпосередньо впливають на витрату стисненого магістрального повітря, є, насамперед, фази наповнення робочих камер, тобто фази початку та кінця робочого циклу. Початковий рушійний (силовий) імпульс, від якого залежать енергетичні показники ударної машини (сила та енергія удару), формується саме під час впуску стисненого повітря з магістралі в камеру робочого ходу (рис. 1). Причому фазу формування рушійного імпульсу доцільно розглядати у вигляді двох етапів – початкового та завершального. Початковий етап фази формування рушійного імпульсу триває з моменту відкриття поршнем-ударником впускних елементів камери робочого ходу Б (під час здійснення ним холостого ходу) до його повної зупинки в крайній «мертвій» точці цієї камери. Тобто в «замкненій» камері Б протягом всього цього етапу повітря стискується, чим він відрізняється від другого (завершального) етапу фази формування рушійного імпульсу. При цьому поршень-ударник до моменту повної зупинки рухався за рахунок, по-перше, розширення стисненого повітря в камері холостого ходу А, яке надходило через відкритий впускний клапан цієї камери на фазі нанесення удару по хвостовику робочого інструмента, і, по-друге, за рахунок імпульсного силового впливу самого хвостовика на цій фазі після нанесення по ньому удару.

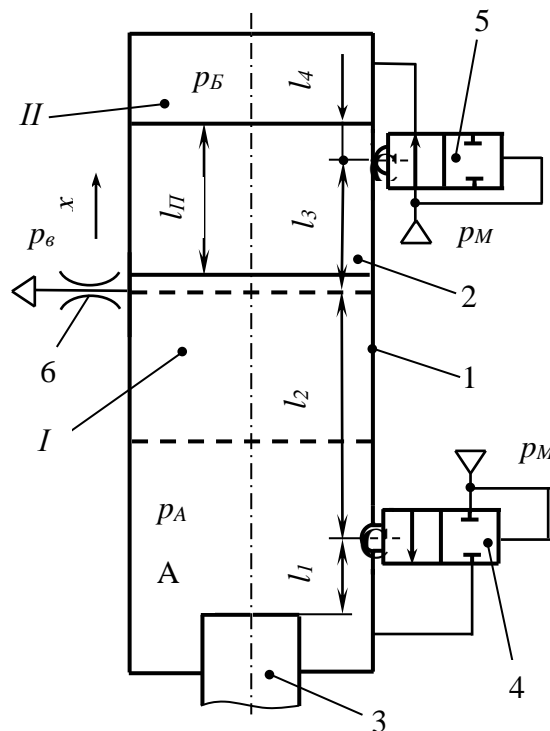


Рис. 1. Розрахункова схема пневматичного привода з механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування його рухом для початкового етапу фази формування рушійного імпульсу:

1 – пневмоциліндр; 2 – поршень-ударник; 3 – хвостовик робочого інструмента; 4 – впускний клапан камери холостого ходу; 5 – впускний клапан камери робочого ходу; 6 – випускні отвори; А – камера холостого ходу; Б – камера робочого ходу; I – одне із проміжних положень поршня-ударника під час його руху (а саме момент перекриття ним випускних отворів 6); II – кінцеве положення поршня-ударника в камері робочого ходу Б під час здійснення ним холостого ходу; x – напрямок руху поршня-ударника (холостий хід)

Завершальний етап фази формування рушійного імпульсу триває з моменту початку руху поршня-ударника з крайньої «мертвої» точки камери робочого ходу Б до моменту закриття впускних клапанів цієї камери. В межах даної публікації розглянемо тільки початковий етап фази формування рушійного імпульсу у вищезазначеній камері, тобто завершення руху поршня-ударника під час здійснення ним холостого ходу.

Протягом початкового етапу фази формування рушійного імпульсу в камері робочого ходу Б в неї надходить стиснене повітря з магістралі, а з камери холостого ходу А відпрацьоване повітря в цей час виходить в атмосферу. Динаміка цього етапу фази досить складна, оскільки залежить від багатьох параметрів, зокрема, від таких лінійних розмірів пневмоциліндра, як відстань між всіма випускними отворів пневмоциліндра та впускного клапана камери робочого ходу Б, компенсаційного об'єму та кільцевої щілини впускного елемента цієї камери, діаметрів випускних отворів у пневмоциліндрі, довжини поршня-ударника тощо.

Тому доцільно скласти математичну модель, дослідження якої дозволить визначити оптимальні величини лінійних та діаметральних розмірів пневматичного привода для забезпечення отримання потрібних енергетичних характеристик ударного вузла (сили та енергії удару) при належній швидкодії. Для цього потрібно прийняти ряд наступних припущень:

- тиск і температура стисненого повітря в магістралі є постійними величинами, при цьому температура відповідає температурі навколишнього середовища;
- тиск стисненого повітря в магістралі 0,5 МПа, що дозволяє розглядати його як ідеальний газ із властивими для нього фізичними характеристиками;
- враховуючи високі швидкісні характеристики ударного вузла і, відповідно, незначну тривалість термодинамічних процесів у камерах робочого та холостого ходу привода, його теплообміном з навколишнім середовищем можна знехтувати, а фізичні процеси в робочих камерах прийняти адіабатними;
- маса клапанів випускних елементів, час їх відкривання та закривання, а також тривалість удару незначні (на порядок менші за тривалість робочого циклу привода), тому ними можна знехтувати; відкриття та закриття клапанів відбувається релейно, при цьому клапани миттєво піднімаються на максимальну висоту;
- втрати повітря внаслідок його просочування з камери стиснення у камеру розрідження під час робочого або холостого ходу поршня-ударника незначні й ними можна знехтувати;
- випускні отвори миттєво відкриваються та закриваються поршнем-ударником на всю величину.

Для таких умов зникає необхідність складання та розв'язування рівнянь термодинаміки, а процес дослідження динаміки початкового етапу фази формування рушійного імпульсу обмежується аналізом складених рівнянь руху поршня-ударника і залежностей, які описують зміну тиску в робочих камерах пневматичного привода.

Шляхом дослідження специфіки фізичних процесів у робочих камерах привода та руху поршня-ударника на окремих фазах робочого циклу, обумовлених конструктивними параметрами пневмопривода (а саме складанням та аналізом їх математичних моделей), виконання відповідних перетворень та спрощень, а також використання результатів наукових досліджень, виконаних у роботі [3], отримано математичну модель початкового етапу фази формування рушійного імпульсу пневматичного привода з механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування його рухом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 x}{dt^2} = (p_A - p_B)F - \left[ \pi D \frac{dx}{dt} \left( \frac{K_D p_M D}{4} + l_{II} \frac{v}{\Delta} \right) + mg \right]; \\ p_A = \frac{0,47 p_M \left[ 1 + \left( 1 + \frac{l_4}{\psi_{VA} S + l_1 + l_2 + l_3} \right)^{-k} \right]}{\left( 1 + \frac{l_2}{\psi_{VA} S + l_1} \right)^k \cdot \left( 1 + \frac{l_3}{\psi_{VA} S + l_1 + l_2} \right)^k} - p_a; \\ p_B = 0,5 p_a \left( 1 - \frac{l_3}{S(1 + \psi_{VB}) - (l_1 + l_2)} \right)^{-k} + 0,8 p_M, \end{array} \right.$$

де  $m$  – маса поршня-ударника;

$p_A, p_B$  – тиск повітря відповідно в камері холостого ходу А та в камері робочого ходу Б пневматичного привода;

$F$ ,  $D$ ,  $l_{II}$  – відповідно площа поперечного перерізу, діаметр та довжина суцільноциліндричного поршня-ударника;

$K_D$  – коефіцієнт, який враховується при визначенні сили сухого тертя; залежить від величини діаметра поршня-ударника;

$p_M$  – абсолютний тиск стисненого повітря в магістралі, від якої здійснюється живлення ударного вузла;

$\nu$  – середня величина коефіцієнта кінематичної в'язкості;

$\Delta$  – зазор між суцільноциліндричним тілом поршня-ударника та «дзеркалом» пневматичного циліндра;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$l_1$  – відстань від торця ударного інструмента виконавчого вузла до вісі впускного клапана камери холостого ходу;

$l_2$  – відстань, яку проходить поршень-ударник після закриття впускного клапана камери холостого ходу до моменту перекриття ним впускних отворів. Тобто це відстань між віссю впускного клапана камери холостого ходу і ударним торцем поршня-ударника в момент перекриття ним впускних отворів;

$l_3$  – відстань між впускними отворами пневмоциліндра та віссю впускного клапана камери робочого ходу;

$l_4$  – відстань, яку проходить поршень-ударник в камері робочого ходу після вмикання її впускного клапана під час першого етапу фази формування рушійного імпульсу;

$\psi_{VA}$  – коефіцієнт, який характеризує співвідношення між довжиною компенсаційної камери холостого ходу та величиною ходу поршня-ударника;

$S$  – хід поршня-ударника;

$k$  – коефіцієнт адіабати;

$p_a$  – атмосферний тиск;

$\psi_{VB}$  – коефіцієнт, який характеризує співвідношення між довжиною компенсаційної камери робочого ходу та величиною ходу поршня-ударника.

Отримані результати розрахунків за цією моделлю доцільно використовувати при подальшому визначенні енергетичних характеристик ударного вузла (машини) та його швидкодії, а також при виборі потрібних для цього оптимальних величин конструктивних параметрів привода.

Вагомим чинником при проектуванні пневматичних приводів ударних вузлів чи машин є визначення тривалості як робочого циклу в цілому, так і тривалості кожної із його фаз. Інформація про час протікання кожної окремо взятої фази дозволяє знаходити резерви для скорочення тривалості (за необхідності) робочого циклу або оптимізувати її. У випадку необхідності зменшення часу протікання окремо взятої фази здійснюється варіювання розмірами відповідних конструктивних параметрів привода, величиною тиску в мережі живлення тощо.

У результаті проведених досліджень встановлено, що тривалість початкового етапу фази формування рушійного імпульсу пневматичного привода з механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування його рухом визначатиметься за формулою:

$$t = \left\{ 2ml_4 / \left[ 0,9p_M F - 0,47p_M F \left( 1 + \frac{l_2}{\psi_{VA}S + l_1} \right)^{-k} \times \left( 1 + \frac{l_3}{\psi_{VA}S + l_1 + l_2} \right)^{-k} \times \left( 1 + \frac{l_4}{\psi_{VA}S + l_1 + l_2 + l_3} \right)^{-k} - 0,5p_a F \right] \right\}^{0,5}.$$

Безумовно, енергетичні показники ударного вузла (які починають формуватись на початковому етапі фази формування рушійного імпульсу) в значній мірі залежать від витратних характеристик привода. Від них залежать також величина ходу поршня-ударника, частота ударів тощо. Згідно рівняння Сен-Венана і Ванцеля [2], масова витрата стисненого



магістрального повітря  $G_{MB}$  у камеру робочого ходу Б на початковому етапі фази формування рушійного імпульсу в цій камері для нашого випадку визначатиметься за формулою:

$$G_{MB} = \frac{f_5^e p_M K \varphi(\sigma_B)}{\sqrt{RT_M}},$$

де  $f_5^e$  – ефективна площа прохідного перерізу впускного елемента 5 камери робочого ходу Б:

$f_5^e = \mu f_5'$  ( $\mu$  – коефіцієнт витрати для впускного елемента камери робочого ходу Б,

визначається за виразом:  $\mu = \sqrt{\frac{1 + \sigma}{1 + \sigma + 4\sigma(\xi - \ln \sigma)}}$ , де  $\sigma$  – відношення тиску в середовищі, в

яке надходить газ, до тиску в середовищі, з якого він витікає;  $\xi$  – коефіцієнт сумарних втрат

повітря, визначається за формулою:  $\xi = \frac{0,5\lambda l}{d}$ , де  $\lambda$  – коефіцієнт тертя;  $l$  і  $d$  – відповідно

довжина та діаметр конструктивного елемента, в якому визначаються втрати енергії потоку повітря;  $f_5'$  – фактична площа прохідного перерізу робочого вікна впускного елемента 5);

$K$  – коефіцієнт:  $K = [2k / (k - 1)]^{0,5}$ ;

$\varphi(\sigma_B)$  – функція витрати для камери робочого ходу Б;

$R$  – газова стала;

$T_M$  – температура стисненого повітря в магістралі.

За рівняння Сен-Венана і Ванцеля [2], масова витрата повітря  $G_{6A}$  з камери холостого ходу А на початковому етапі фази формування рушійного імпульсу в камері робочого ходу Б для нашого випадку визначатиметься за формулою:

$$G_{6A} = f_6^e p_A K \varphi(\sigma_A) / (RT_M)^{0,5},$$

де  $f_6^e$  – ефективна площа прохідного перерізу випускних отворів 6:  $f_6^e = \mu_1 f_6'$  (де  $\mu_1$  –

коефіцієнт витрати для випускних отворів;  $f_6'$  – фактична площа випускних отворів). Величини

$\mu_1$  та  $f_6'$  визначаються аналогічно попередньому випадку для випадку наповнення камери робочого ходу Б стисненим магістральним повітрям;

$\varphi(\sigma_A)$  – функція витрати для камери холостого ходу А.

Витратні функції  $\varphi(\sigma_B)$  та  $\varphi(\sigma_A)$  залежать від видів термодинамічних процесів, що протікають в робочих камерах пневмопривода [2]. Оскільки згідно прийнятих раніше припущень фізичні процеси у камерах робочого та холостого ходів привода прийнято адіабатними, то функції  $\varphi(\sigma_B)$  та  $\varphi(\sigma_A)$  визначатимуться за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(\sigma_A) &= \sqrt{\sigma_A^{2/k} - \sigma_A^{(k+1)/k}} \\ \varphi(\sigma_B) &= \sqrt{\sigma_B^{2/k} - \sigma_B^{(k+1)/k}} \end{aligned} \right\} \text{при } 0,528 < \sigma_A, \sigma_B < 1;$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi(\sigma_A) &= 0,2588 \\ \varphi(\sigma_B) &= 0,2588 \end{aligned} \right\} \text{при } 0 < \sigma_A, \sigma_B < 0,528.$$

**Висновок.** Запропоновану математичну модель доцільно використовувати при проектуванні енергоощадних конструкцій пневматичних приводів із механічним зв'язком між поршнем-ударником та системою керування. Вона дозволить істотно полегшити виконання завдання щодо отримання заданих енергетичних характеристик та швидкодії ударного вузла

(машини) та вибору потрібних для цього оптимальних величин конструктивних параметрів привода при оптимальних витратах стисненого повітря.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у дослідженні завершального етапу фази формування рушійного імпульсу в камері робочого ходу, а також сил протидії здійсненню поршнем-ударником імпульсного навантаження на робочий орган з метою їх зменшення або оптимізації та задля економії енергоресурсів.

#### Інформаційні джерела

1. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
2. Федорець В.О., Педченко М.Н., Струтинський В.Б. та ін. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: підручник / за ред. В.О. Федорця. Київ: Вища шк., 1995. 463 с.
3. Стасюк В.М. Пневматичний привод виконавчих органів ударних машин із механічним зв'язком поршня-ударника з впускними елементами: дис...канд. техн. наук: 050203. Вінниця, 2003. 296 с.

**Стасюк В.М.**

Луцкий национальный технический университет

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА ФАЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДВИЖУЩЕГО ИМПУЛЬСА ПНЕВМОПРИВОДА С МЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ МЕЖДУ ПОРШНЕМ-УДАРНИКОМ И СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Пневмоприводы характеризуются повышенной надежностью в сравнении с другими типами приводов во время эксплуатации в неблагоприятных условиях. Однако сжатый воздух – достаточно дорогой энергоноситель. Поэтому задача удешевления эксплуатации пневматических машин приобрела сегодня особую актуальность. Эффективным путем ее решения является глубокий анализ рабочих циклов приводов с целью выявления фаз, энергоемкость которых самая высокая, и поиск конструктивных решений по ее уменьшению.

Объектом исследования служит пневмопривод ударных машин с механической связью между поршнем-ударником и системой управления. В работе проведены исследования фазы наполнения камеры рабочего хода этого привода, которая оказывает определяющее влияние на формирование энергетических характеристик ударной машины и непосредственно связана с затратами сжатого воздуха. Фазу рассмотрено дифференцированной на начальный и заключительный этапы, на которых осуществляется формирование движущего импульса для возникновения движения поршня-ударника.

Выполнен детальный анализ начального этапа, разработана его математическая модель, которую следует использовать при проектировании энергосберегающих конструкций пневматических приводов рассматриваемого типа. Ее использование позволит облегчить выполнение задачи по получению заданных энергетических характеристик и производительности ударной машины, а также выбора нужных для этого рациональных значений конструктивных параметров привода при оптимальных затратах сжатого воздуха.

**Ключевые слова:** Ключевые слова: пневмопривод, поршень-ударник, фаза, начальный этап, математическая модель.

**Stasiuk V.M.**

Lutsk National Technical University

### MATHEMATICAL MODEL OF THE INITIAL STAGE OF THE FORMATION PHASE OF AN IMPACT OF THE PNEUMATIC DRIVE WITH A MECHANICAL CONNECTION BETWEEN THE PISTON-DRUMMER AND THE CONTROL SYSTEM

Pneumatic drives are characterized by higher reliability compared to other types of drives during operation in adverse conditions. However, compressed air is a rather expensive energy source. Therefore, the task of cheapening the operation of pneumatic machines has become of particular urgency today. An effective solution to this task is a thorough analysis of drive cycles to identify the phases with the highest energy intensity and the search for constructive solutions to reduce it.

The object of the study is a pneumatic drive of percussion machines with a mechanical connection between the piston-drummer and the control system. In this paper the phase of filling the chamber of the working stroke of such a drive is investigated as having a decisive influence on the formation of the power characteristics of a percussion machine and is directly related to the consumption of compressed air. The phase is considered to be divided into the initial and final stages, in which the formation of the driving momentum for the motion of the piston-drummer occurs.

A detailed analysis of the initial stage has been made, its mathematical model has been developed, which should be used in the design of energy-saving constructions of pneumatic drives of the type under consideration. Its use will facilitate the task of obtaining the specified energy characteristics and the speed of the percussion machine and selecting the optimal values of the design parameters of the drive at optimal compressed air consumption.

**Keywords:** pneumatic drive, piston-drummer, phase, initial stage, mathematical model.

УДК 621.317.619

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-24>

Тичков Д.В., Бондаренко М.О., д.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет

Антонюк В.С., д.т.н., професор,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ З РІЗНОЮ ФОРМОЮ ЕЛЕКТРОДІВ

*В ході проведених розрахунків та аналізу експериментальних даних встановлена можливість проектування ємнісних перетворювачів з обкладками складної конфігурації (квадратних, прямокутних та круглих) за умови, що одна з обкладок залишається нерухомою, тоді, як інша – рухається в паралельній площині відносно нерухомої. Проведені експериментальні дослідження підтверджують закономірності зміни ємності перетворювача від величини діелектричної проникливості середовища та геометричних параметрів обкладок цього перетворювача. Показано, що: для квадратної форми обкладок, при рівномірному збільшенні площі їх перекриття, ємність перетворювача збільшується за параболічним законом; для прямокутної форми обкладок, при рівномірному збільшенні кута перекриття обкладок, ємність перетворювача збільшується тангенціально; для комбінованої (рухомої прямокутної та нерухомої круглої) форми обкладок, при рівномірному їх русі, ємність перетворювача збільшується за гіперболічним законом. Завдяки високій точності результатів експериментальних досліджень діелектричної проникливості матеріалів, відкриваються можливості подальших досліджень однорідності даних матеріалів та можливості виявлення внутрішніх дефектів, які можуть з'явитися в процесі виготовлення виробів при порушенні технології виробництва.*

**Ключові слова:** ємнісний перетворювач, діелектрична проникливість, площа перекриття, електропровідна обкладка, кут перекриття.

**Постановка проблеми.** Сучасні композиційні матеріали мають унікальний набір електричних характеристик, що залежать від їх діелектричних властивостей. При цьому, такі характеристики можуть змінюватися по перетину матеріалу, як лінійно і нелінійно, так і дискретно. Точні вимірювання цих властивостей повинні забезпечити вчених та інженерів цінною інформацією про доцільність використання цього матеріалу в різних конструкціях контрольно-вимірювальних приладів та систем на їх базі, що знайшло застосування в різноманітних галузях сучасної авіакосмічної техніки, мікро- та наноелектроніки, функціональної медицини, тощо. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити точність та надійність таких приладів, та, в цілому, поліпшити процес контролю, що відбувається за їх допомогою.

Так, вимірювання діелектричних властивостей матеріалів може дати інформацію про параметри, які є критичними при проектуванні в багатьох областях електроніки. Наприклад, втрати в ізоляції кабелю, імпеданс підкладки або частота діелектричного резонатора залежать від їх діелектричних властивостей. Знання діелектричних властивостей матеріалів також дає переваги в більш сучасних галузях з областей промислової мікрохвильової обробки продуктів харчування, гуми, пластику та кераміки.

Відомими вітчизняними та закордонними фахівцями в області вимірювання електричних та неелектричних величин, у тому числі й електроємнісним способом, такими, як: Шарапов В.М., Готра З.Ю., Поліщук Є.С., Івах Р.Г., Евтіхіїв М.М., Базіло К.В., Zhu Y., Samani A., Risos A. та іншими проводяться вивчення і аналіз існуючих ємнісних перетворювачів та методів на яких базуються принципи їх дії. Проте, такі дослідження проводяться цими авторами для ємнісних перетворювачів класичних конструкцій та прямокутної форми обкладок, що розташовані нерухомо одна відносно. Інформацію щодо вимірювання діелектричної проникливості ємнісними перетворювачами з обкладками складної форми, за умови, що одна з таких обкладок закріплена нерухомо, а інша – рухома відносно першої в паралельній до неї площині у відкритих літературних джерелах та джерелах Інтернет не знайдено [1–10].

Тому, актуальні на сьогоднішній день питання визначення діелектричної проникливості ємнісними перетворювачами з обкладками складної конструкції, коли одна з таких обкладок рухається в паралельній площині до іншої – розташованої нерухомо [11-13], досі залишаються невизначеними.

**Формулювання цілей статті.** Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни ємності перетворювача від величини діелектричної проникливості середовища та геометричних параметрів обкладок цього перетворювача.

**Методика та основні результати дослідження.**

Розрахунок та дослідження ємнісних перетворювачів з обкладками квадратної форми проводилися згідно схеми для вимірювання ємності.

Схема ємнісного перетворювача з обкладками квадратної форми, представлена на рис.1.а.

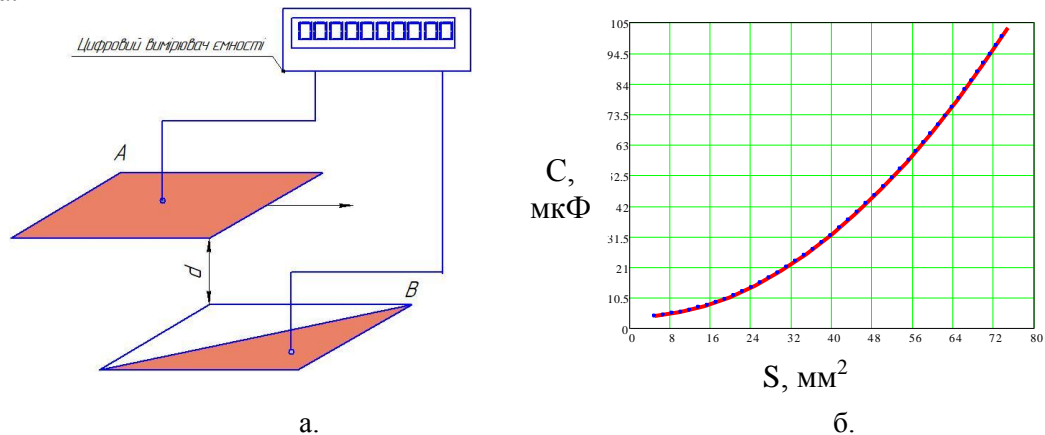


Рис.1. Схема для вимірювання ємності (а) та залежність ємності первинного перетворювача з обкладками квадратної форм від площі перекриття обкладок (б):  $\varepsilon = 8$ ;  $d = 1$  мм,  $A, B$  – відповідно, обкладка ємнісного перетворювача, що рухається ( $A$ ) та залишається нерухомою ( $B$ );  $d$  – відстань між обкладками, мм (товщина діелектричного шару матеріалу)

Для розрахунку такого ємнісного перетворювача використовується розроблена в роботі [1] методика.

При цьому ємність первинного перетворювача з обкладками квадратної форми, яка змінюється перекриттям рухомої пластини  $A$  іншою – нерухомою пластиною  $B$ , знаходиться за відомою формулою [4]:

$$C = \left( \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S^2}{d} \right), \quad (1)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала, яка дорівнює,  $8,85 \times 10^{-12}$  А·с/(В·м);

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу, що знаходиться у міжелектродному просторі;

$S$  – площа перекриття однієї обкладки іншою;

$d$  – відстань між обкладками.

Експериментальне визначення коефіцієнтів функції перетворення  $C = f(S)$  та похибки вимірювання проводиться в такій послідовності:

1. За допомогою цифрового вимірювача ємності визначається похибка вимірювання ємності зовнішніх факторів  $\Delta C$  (конструктивна складова ємності перетворювача – у нашому випадку  $\Delta C = 3,5 \times 10^{-12}$  Ф).

2. Підключаються досліджувані обкладки електродами до цифрового вимірювача ємності.

3. Починається переміщення обкладки  $A$  відносно обкладки  $B$  (рис.1.а) із заданою постійною швидкістю. З отриманими результатами вимірювання проводяться необхідні розрахунки за формулою (1), що аналізуються.

В результаті аналізу залежностей (рис.1.б) встановлено, що зі збільшенням площі перекриття обкладок ємність перетворювача збільшується нелінійно (за параболічним законом), що підтверджує адекватність проведених експериментів та розрахунків (розбіжність між розрахунками та експериментами даними не перевищує 1,5%).

Розрахунок та дослідження ємнісних перетворювачів з обкладками прямокутної форми проводилися згідно схеми для вимірювання ємності.

Схема ємнісного перетворювача з обкладками прямокутної форми представлена на рис.2.а. Експериментальне визначення коефіцієнтів функції перетворення  $C=f(S)$  та похибки вимірювання проводиться у послідовності наведеній вище, як для обкладок квадратної форми.

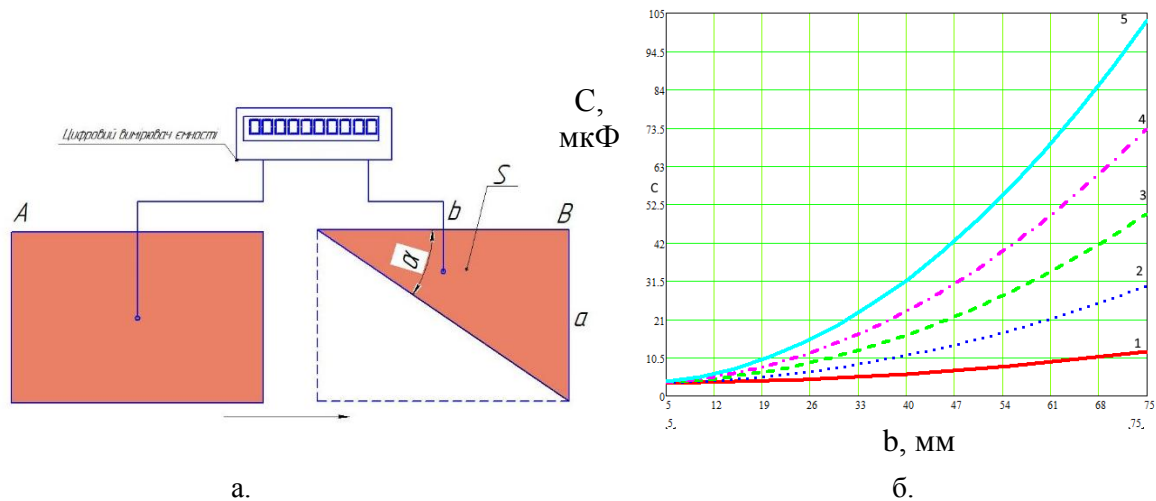


Рис.2. Схема ємнісного перетворювача з обкладками прямокутної форми (а) та графік залежності ємності первинного перетворювача від довжини обкладки В (b) та кута перекриття ( $1 - \alpha = 5^\circ$ ,  $2 - \alpha = 15^\circ$ ,  $3 - \alpha = 25^\circ$ ,  $4 - \alpha = 35^\circ$ ,  $5 - \alpha = 45^\circ$ ) (б).

A, B – відповідно, обкладка ємнісного перетворювача, що рухається (A) та залишається нерухомою (B); a – ширина обкладок ємнісного перетворювача, мм ( $a = b \cdot \operatorname{tg} \alpha$ ).

При цьому, ємність первинного перетворювача з обкладками прямокутної форми, площа перекриття обкладок якої змінюється визначається так:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{4d} b^4 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha), \quad (2)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала, яка дорівнює,  $8,85 \times 10^{-12}$  А·с/(В·м);

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу, що знаходиться у міжелектродному просторі;

S – площа перекриття однієї обкладки іншою, мм<sup>2</sup>:

$$S = \frac{1}{2} (b^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)),$$

d – відстань між обкладками, мм.

$\alpha$  – відношення сторін електроду на обкладці B;

b – довжина перекриття нерухомої обкладки B (рис.2.б) по горизонталі рухомою обкладкою A (5 мм; 10 мм; 15 мм; ...; 75 мм).

В результаті аналізу графіку (рис.2.б) встановлено, що при збільшенні кута перекриття  $\alpha$  та площі перекриття S, ємність перетворювача збільшується за нелінійним законом. При цьому зі збільшенням кута  $\alpha$ , ємність перетворювача збільшується тангенціально (розбіжність між розрахунками та експериментами даними становила 1,8 – 3,1%).

Розрахунок та дослідження ємнісного перетворювача з нерухомою обкладкою круглої форми та рухомою обкладкою прямокутної форми проводилися згідно схеми для вимірювання ємності.

Схема ємнісного перетворювача з нерухомою обкладкою круглої форми та рухомою обкладкою прямокутної форми, представлена на рис.3.а. Експериментальне визначення коефіцієнтів функції перетворення  $C=f(S)$  та похибки вимірювання проводиться у послідовності наведеній вище, як для обкладок квадратної форми.

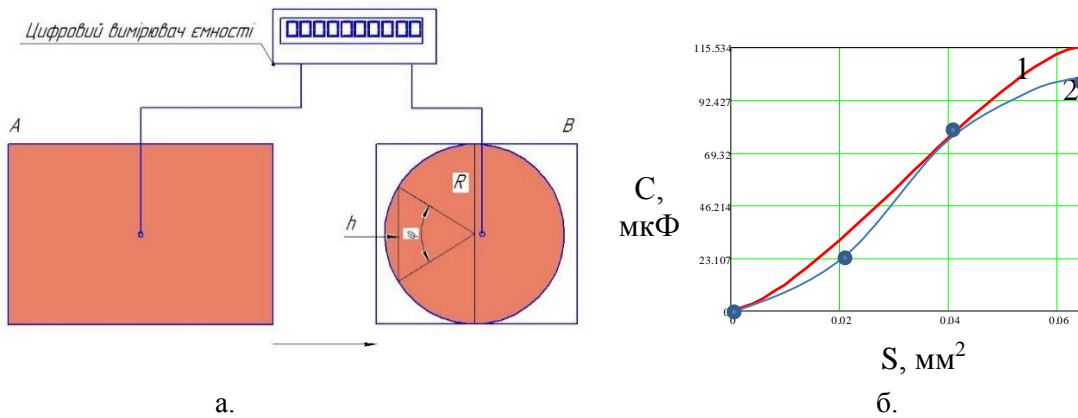


Рис.3. Схема ємнісного перетворювача з нерухомою обкладкою круглої форми (B) та рухомою обкладкою (A) прямокутної форми (а) та залежність ємності  $C$  первинного перетворювача від площі перекриття  $S$  (б): 1 – розрахункові; 2 – експериментально отримані дані  
 $A$ ,  $B$  – відповідно, обкладка ємнісного перетворювача, що рухається (A) та залишається нерухомою (B);  $\varphi$  – кут перекриття обкладок;  $R$  – радіус обкладки круглої форми, мм;  $h$  – довжина хорди сектора, що перекривається рухомою обкладкою, мм.

В цьому випадку, ємність первинного перетворювача, яка змінюється перекриттям однією пластинною іншою, визначається так:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 R^4}{4d} \cdot \left( \arcsin \frac{h}{2R} - \sqrt{h} + \sqrt{\frac{h^3}{4R^4}} \right)^2, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала, яка дорівнює,  $8,85 \times 10^{-12}$  А·с/(В·м);  
 $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу, що знаходиться у міжелектродному просторі;  
 $d$  – відстань між обкладками, мм.  
 $S$  – площа перекриття нерухомої обкладки рухомою, мм<sup>2</sup>:

$$S = \frac{R^2}{2} \cdot (\varphi - \sin \varphi) = \frac{R^2}{2} \cdot \left( \arcsin \frac{h}{2R} - \sqrt{h} + \sqrt{\frac{h^3}{4R^4}} \right),$$

$\varphi$  – кут перекриття обкладок;  
 $R$  – радіус обкладки круглої форми, мм;  
 $h$  – довжина хорди сектора, що перекривається рухомою обкладкою, мм.

Залежність зміни ємності розробленого перетворювача від площі перекриття обкладок представлена на рис.3.б. За результатами аналізу цієї залежності встановлено, що у даній експериментальній схемі на початковому та завершальному етапах перекриття обкладок зміна ємності відбувається нелінійно, тоді, як в центральній частині, ця залежність носить майже лінійний характер. На думку авторів, це пов'язано з більш різкою зміною площі перекриття саме в першій та останній чвертях діаметру площі круглої обкладки. Слід також зауважити, що й розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними вища, ніж у попередніх випадках у 2,6 – 5,2 рази і становить 7,8 – 8,1%.

**Висновки.** В результаті дослідження ємнісних перетворювачів з динамічними та статичними обкладками різної геометричної форми для вимірювання діелектричної проникливості різних матеріалів були запропоновані розрахункові схеми, адекватність яких підтверджена експериментально. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними при цьому становила: для квадратної форми обкладок – не більше 1,5%; для прямокутної форми обкладок – 1,8 – 3,1%; для комбінованої (рухомої прямокутної та нерухомої круглої) форми обкладок – 7,8 – 8,1%.

Встановлено, що у випадку двох квадратних або прямокутних електродів з різними площами перекриття, графік залежності має нелінійний параболічний характер, в той час, як для одного прямокутного та круглого електроду, цей графік залежності носить нелінійний гіперболічний характер, що може бути вигідно використано при розробці та впровадженні в даних ємнісних перетворювачів в різноманітних приладах та системах, в тому числі мікро

системної техніки при нанесенні на нерівні поверхні (наприклад ємнісних датчиках обертового типу) тощо.

Подальші дослідження авторів у цьому напрямку будуть присвячені розрахункам та розробці ємнісних перетворювачів складної геометричної форми обкладок, що рухаються незалежно для визначення діелектричної проникливості різноманітних матеріалів.

#### Інформаційні джерела

1. Шарапов, В. М.; Минаев, И. Г.; Базило К. В.; и др., Емкостные датчики / Под. ред. В.М.Шарапова, Черкасы : Брама-Украина, 2010, 152 с.

2. Zhu, Y.; Moheimani, S. O. R.; Yuce, M. R.; et al. Simultaneous Capacitive and Electrothermal Position Sensing in a Micromachined Nanopositioner. IEEE Electron Device Letters. 2011, Vol.32, Iss.8, P. 1146-1148. DOI: 10.1109/LED.2011.2155027

3. Івах, Р. М. Методика розрахунку циліндричного ємнісного первинного перетворювача із внутрішнім електродом складної конструкції // Вимірювальна техніка і метрологія, 2006, С. 125 – 131.

4. Готра, З. Ю.; Ильницкий, Л. Я.; Полищук, Е. С.; и др., Датчики: Справочник / Под ред. З.Ю. Готры, О.И. Чайковского, Львов : Каменяр, 1995, 312 с.

5. Джежора, А. А. Влияние экрана подложки на емкость датчика / А. А. Джежора, В. В. Рубаник // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы III междунар. научно-технич. конф. - Могилев, 2009. - С.110-112.

6. Hesabgar S. M.; Jafari R.; Samani A.; et al. Accurate Technique for Measuring Electrical Permittivity of Biological Tissues at Low Frequencies and Sensitivity Analysis. IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (11-13 June 2018, Rome, Italy) DOI: 10.1109/MeMeA.2018.8438680.

7. Risos, A.; Long, N.; Hunze, A.; Gouws, G. A 3D Faraday Shield for Interdigitated Dielectrometry Sensors and Its Effect on Capacitance. *Sensors*. 2017, Vol.17, 77; DOI: 10.3390/S17010077.

8. Risos, A.; Gouws, G. A In-situ aging monitoring of transformer oil via the relative permittivity and DC conductivity using novel interdigitated dielectrometry sensors (IDS). *Sensors and Actuators B: Chemical* 2019, Vol.287, P. 602-610; DOI: 10.1016/j.snb.2018.12.037.

9. Емкостные преобразователи, чувствительные элементы, датчики [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://sensorse.com/page139.html>.

10. Capacitive Sensors [Електронний ресурс]. – 2000. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.capsense.com/capsense-wp.pdf>

11. Tychkov D. V. Measurement methods analysis of dielectric permeability / D. V. Tychkov, С. V. Bazilo, V. V. Tychkov [Text] // Датчики, прилади та системи–2018 : VII Міжнародна науково-технічна конференція, Черкаси – Херсон – Лазурне, 17–21 вересня 2018 р. : тези доповідей. – Черкаси: видавець ФОП Гордієнко С.І., 2018. – С. 38–39.

12. Тичков Д. В. Ємнісні перетворювачі як датчики контролю електродинамічних параметрів діелектричних матеріалів у виробничих процесах електронного приладобудування [Електронний ресурс] / Д. В. Тичков, К. В. Базіло, В. В. Тичков // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 1-2 листопада 2018 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2018. – С. 120-122.

13. Tychkov D. V. Capacitive method of dielectric permeability measurement of substances [Text] / D. V. Tychkov, С. V. Bazilo, V. V. Tychkov // Проблеми інформатизації : Шоста Міжнародна науково-технічна конференція, Черкаси, 14-16 листопада 2018 р. : тези доповідей. – Черкаси : ЧДТУ, ВА ЗС АР, УЕІГН, ПНТУ, 2018. – 125 с.

**Тычков Д.В., Бондаренко М.А., д.т.н., доцент**

Черкасский государственный технологический университет

**Антонюк В.С., д.т.н., профессор,**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»



## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ЭЛЕКТРОДОВ

*В ходе проведенных расчетов и анализа экспериментальных данных установлена возможность проектирования емкостных преобразователей с обкладками сложной конфигурации (квадратных, прямоугольных и круглых) при условии, что одна из обкладок остается неподвижной, тогда как другая - движется в параллельной плоскости относительно неподвижной. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают закономерности изменения емкости преобразователя от величины диэлектрической проницаемости среды и геометрических параметров обкладок этого преобразователя. Показано, что: для квадратной формы обкладок, при равномерном увеличении площади их перекрытия, емкость преобразователя увеличивается за параболическим законом; для прямоугольной формы обкладок, при равномерном увеличении угла перекрытия обкладок, емкость преобразователя увеличивается тангенциально; для комбинированной (подвижной прямоугольной и неподвижной круглой) формы обкладок, при равномерном их движении, емкость преобразователя увеличивается за гиперболическим законом. Благодаря высокой точности результатов экспериментальных исследований диэлектрической проницаемости материалов, открываются возможности дальнейших исследований однородности данных материалов и возможности выявления внутренних дефектов, которые могут появиться в процессе изготовления изделий при нарушении технологии производства.*

**Ключевые слова:** емкостный преобразователь, диэлектрическая проницаемость, площадь перекрытия, электропроводящая обкладка, угол перекрытия.

**Tychkov D.V., Bondarenko M.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor**  
Cherkasy State Technological University

**Antonjuk V.S., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor**  
Professor

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## FEATURES OF CALCULATION AND RESEARCHES BY CAPACITY SENSORS DIELECTRIC PERMITTIVITY WITH DIFFERENT ELECTRODE FORMS

*In the course of the calculations and analysis of experimental data, the possibility of designing capacitive sensors with plates of complex configuration (square, rectangular and round) was established, provided that one of the plates remains stationary, while the other is moving in a parallel plane relative to the stationary. The experimental researches confirmed the patterns of capacitance change of the sensor from the magnitude of the dielectric insight of the medium and the geometric parameters of the plates of this sensor. It is shown that: for a square shape of the cover, with a uniform increase in the area of their overlap, the capacitance of the sensor increases according to the parabolic law; for a rectangular form of the cover, with a uniform increase in the angle of the overlap of the plates, the capacitance of the sensor increases tangentially; for combined (moving rectangular and fixed circular) shapes of the plates, with their uniform motion, the capacitance of the sensor increases with hyperbolic law. Due to the high accuracy of the results of experimental studies of dielectric insight of materials, opportunities for further research on the homogeneity of these materials and the possibility of identifying internal defects that may appear in the process of manufacturing products in violation of production technology.*

**Keywords:** capacitive sensor, dielectric constant, overlap area, electrically conductive plate, overlap angle.

УДК 621. 315. 592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-25>

Цісар О. В. к.х.н., Піскач Л. В. к.х.н., доц., Мирончук Г.Л., к.ф.м.н., доц., Кітик І.В. д.ф.м.н., проф.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

**НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПОЛУК  $TlC^{III}D^{IV}X_6$** 

*В даній роботі проведено дослідження фотоіндукованої генерації третьої гармоніки в сполуках  $TlC^{III}D^{IV}X_6$ . Для фотоіндукуючого збудження було використано різні типи лазерів з однаковою потужністю: ГДГ Nd:YAG лазера (532 нм), фундаментальний промінь Nd:YAG лазера (1064 нм) та ІЧ-мікросекундний  $CO_2$  лазер з довжиною хвилі 9400 нм. Встановлено, що для кристалів  $TlInGe_2S_6$  та  $TlGaSn_2Se_6$  спостерігається можливість модулювати інтенсивність сигналу ГТГ, що дозволяє розглядати ці сполуки як новий тип нелінійно-оптичних лазерних модуляторів.*

**Ключові слова:** нелінійна оптика, лазер, генерація третьої гармоніки.

**Постановка проблеми.** Розвиток сучасних технологій потребує пошуку нових перспективних матеріалів, як основного джерела розширення та покращення функціональних можливостей приладів напівпровідникової електроніки. Науковою основою такого пошуку є вивчення фізико-хімічної взаємодії у багатокомпонентних системах, дослідження структури та властивостей виявлених фаз.

Значний інтерес в аспекті пошуку нових фаз має дослідження взаємодії у системах  $Tl_2X-C^{III}X-D^{IV}X_2$ , оскільки за рядом фізико-хімічних властивостей талій є подібним до лужних металів, а ступінь їх вивчення є дуже обмежений. У цих системах аналогічно до Cu- та Ag-вмісних відоме утворення сполук  $TlC^{III}X_2$ , що використовуються в фотовольтаніці та нелінійній оптиці, і тетрарних фаз на перерізах  $TlC^{III}X_2-D^{IV}X_2$ . Дослідження властивостей одержаних матеріалів дасть можливість прогнозувати напрями їх практичного використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сполуки  $Tl_2D^{IV}X_3$  завдяки ацентричності їх структури можуть застосовуватися в пристроях нелінійної оптики. Для них характерні області прозорості у видимій та інфрачервоній областях електромагнітного спектру (до 21 мкм у  $Tl_2SnSe_3$ ), великі показники заломлення, фотопровідність, здатність до поляризації [1]. В роботі [2] рентгеновським методом порошку встановлена кристалічна структура сполуки  $TlInGe_2Se_6$ . Визначено, що вона кристалізується у власному структурному типі у тригональній просторовій групі  $R\bar{3}$ . Уточнення структури сполуки  $TlInGe_2S_6$  проводили за допомогою даних порошкової дифракції, отриманих на дифрактометрі ДРОН 4-13 (Cu  $K\alpha$ -випромінювання, геометрія відбиття). Дифрактограма була проіндексована у тригональній сингонії. Визначені параметри елементарної комірки були подібні до отриманих для нового структурного типу  $TlInGe_2Se_6$  [2]. Кристалічна структура  $TlGaSn_2Se_6$  також була уточнена, використовуючи вихідні атомні координати структурного типу  $TlInGe_2Se_6$  (просторова група  $R\bar{3}$ ) [3]. Для пояснення фізико-хімічних властивостей в роботах [2-4] проведено вивчення особливостей електронної будови та спектрального розподілу коефіцієнта поглинання сполук  $TlInGe_2Se_6$ ,  $TlInGe_2S_6$  та  $TlGaSn_2Se_6$ .

**Виділення невирішеної проблеми.** Сполуки типу  $TlC^{III}D^{IV}X_6$  можуть представляти інтерес для нелінійної оптики завдяки винятковому вкладу ангармонічних фононів. Добре відомо, що генерація третьої гармоніки (ГТГ), на відміну від генерації другої гармоніки (ГДГ), не потребує нецентросиметричності. Однак за допомогою зовнішнього світла можна змінити ефективність ГТГ, що може бути важливим для лазерних модуляторів.

**Результати дослідження.** Для дослідження фотоіндукованих нелінійно-оптичних властивостей було використано різні типи лазерів з однаковою потужністю: ГДГ Nd:YAG лазера (532 нм), фундаментальний промінь Nd:YAG лазера (1064 нм) та ІЧ-мікросекундний  $CO_2$  лазер з довжиною хвилі 9400 нм. Стабільність лазерних променів дозволяє підвищити відтворюваність і в нашому випадку становить близько 3-4%. Для кращого визначення спостережуваних ефектів розглянуто декілька різних точок зразка та використано 40-50 імпульсів для кожної поверхні точки. Варіація сигналу вздовж поверхні не перевищувала 5-7%. Поверхня досліджуваних зразків оберталася щодо падаючого променя, використовуючи обертовий стіл із кроком кута 30 (Рис.1), знайдено максимум інтенсивності ГТГ від кутової залежності.

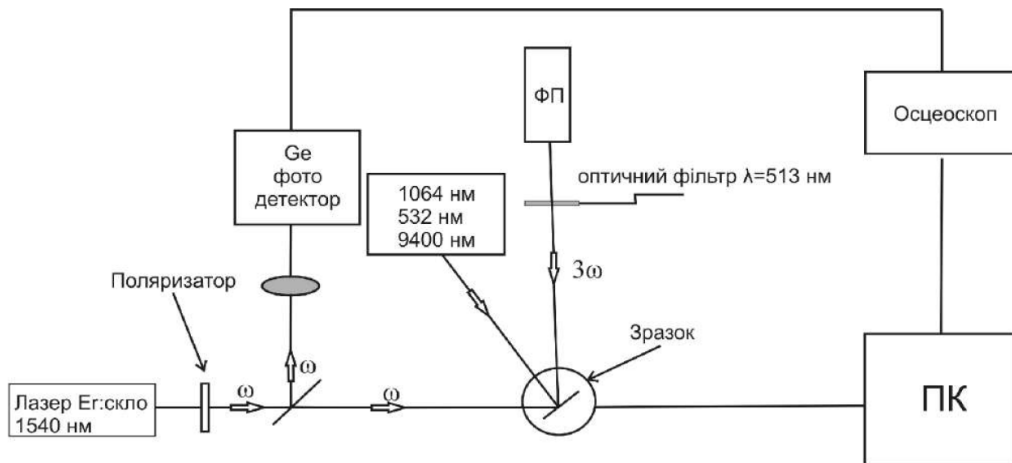


Рис.1. Принципова схема для вимірювання фотоіндукованої ГТГ

Встановлено, що фототермічні ефекти викликають підвищення температури, однак зміна температури у зразку не перевищує 6–7 К. Досліджено кутову залежність інтенсивності ГТГ для кожного фотоіндукуючого лазера. Для визначення відносних змін лазерно-індукованої ГТГ в роботі брали лише зареєстровану максимальну інтенсивність виходу ГТГ.

Оскільки зовнішнє світло має довжину хвилі з енергією, більшою за ширину забороненої зони, воно проникатиме в тонкий наночар 10–100 нм залежно від довжини хвилі. Товщина визначається коефіцієнтом поглинання для відповідних довжин хвиль. У цьому випадку, завдяки геометрії експерименту (режим відбиття), лише дуже тонкий шар – майже поверхня зразка – відповідає за зміни ГТГ. Спостережуване явище можна пояснити фотоіндукованими змінами дипольних моментів і, зокрема, векторною різницею між моментами збуджених та основних станів. Глибина проникнення фотоіндукуючого лазера буде залежати від поглинання для даної довжини хвилі, і буде спостерігатися різний вплив на поведінку дипольних моментів (як основних, так і збуджених) через перерозподіл густини об'ємного заряду. З цієї причини дуже перспективним видається використання лазерного світла з енергією вище та нижче ширини забороненої зони, а також поблизу фононних резонансів.

Встановлено, що інтенсивність ГТГ фундаментального променя дуже чутлива до зовнішнього стимулюючого пучка (Рис. 2), включаючи профіль променя.

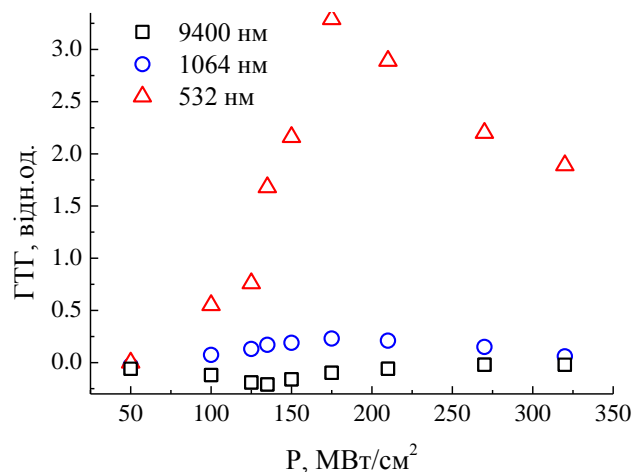


Рис.2. Фотоіндуковані зміни ГТГ залежно від довжини хвилі фотоіндукуючого лазера

Максимальний сигнал ГТГ отримано для зовнішнього лазера при 532 нм. Мінімальні зміни сигналу ГТГ спостерігаються при фотоіндукованому збудженні лазером на довжині хвилі 1064 нм. Тому, походження ефекту зумовлено фотополіаризованими наночарами опроміненої поверхні кристала  $TlInGe_2S_6$  через підвищені електронні дипольні моменти. У випадку збудження фононної підсистеми (9400 нм) спостерігалися деякі зміни знаку ГТГ для вихідного сигналу, що може підтвердити той факт, що для такого роду матеріалу фононний вклад має

протилежний знак. Це дозволяє розглядати  $\text{TlInGe}_2\text{S}_6$  як перспективний лазерний матеріал. Змінюючи довжини хвиль фотоіндукуючих лазерів, можна досягнути змін отриманих НЛО констант. Це може відкрити рідкісну можливість керувати вихідними НЛО ефектами за допомогою зовнішніх лазерів. Варто зазначити, що існування ефекту ГТГ було встановлено як дуже корисне для практичного застосування в ряді інших сполук, зокрема для органічних плівок, тонких плівок мікрокристалічного  $\text{ZnO}$  на сапфірових підкладках, спін-нанесених тонких плівок азобензолних полімерів із різними пуш-пульними бічними ланцюгами, тонких плівок металофталоціанінів, прозорих аморфних тонких плівок оксиду цинку. Наведені матеріали в деяких випадках демонструють значення ГТГ, які є досить високими для потенційних застосувань у оптичних комутаційних пристроях на основі зміни показників заломлення. Ми вважаємо, що визначені в даній роботі значення ефектів ГТГ досить високі, щоб розглядати сполуку  $\text{TlInGe}_2\text{S}_6$  як дуже перспективний матеріал для НЛО застосувань.

Також в роботі проведено дослідження нелінійно-оптичних властивостей третього порядку в сполуці  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$ , зокрема генерації третьої гармоніки (ГТГ), яка викликана фундаментальним променем імпульсного  $\text{Nd:YAG}$  лазера (1064 нм). Для досліджень впливу фотоіндукованого випромінювання на інтенсивність ГТГ, використано безперервний лазер з довжиною хвилі 532 нм. Промінь лазера  $\text{Nd:YAG}$  при взаємодії з поверхнею кристалів генерував сигнал ГТГ. Починаючи з  $170 \text{ Дж/м}^2$  (рис. 3), спостерігається різке збільшення інтенсивності генерації третьої гармоніки.

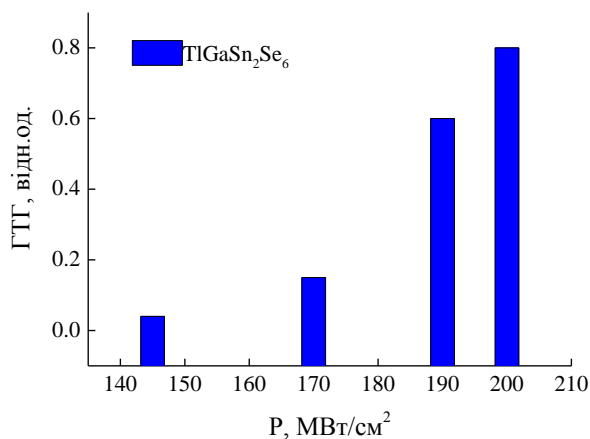


Рис.3. Інтенсивність ГТГ для сполуки  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$

Ефективністю ГТГ можна додатково керувати, використовуючи зовнішню фотополяризацію. Ця поведінка дає унікальну можливість змінити інтенсивність ГТГ шляхом додаткового лазерного опромінення, що зумовлено просторовим перерозподілом вільних носіїв заряду, що дає додатковий внесок у зміни ГТГ.

Досліджено зміни інтенсивності ГТГ під впливом зовнішнього лазера, що працює з поляризованим світлом (безперервний зелений лазер 532 нм). Спостережувані лазерно-стимульовані зміни в ГТГ визначаються зміною дипольних моментів, зокрема, векторною різницею між моментами збудженого та основного станів. Оскільки ми спостерігаємо значні індуковані світлом зміни ГТГ, це вказує на наявність ефективних змін відповідних матеріальних констант (викликаних індукованою фотополяризацією).

На відміну від інших тетраарних халькогенідів, сигнал інтенсивності фотоіндукованої ГТГ на кристалі  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$  зменшується під час фотоіндукуючої обробки. Цей факт підтверджує принципову різницю лазерно-індукованої ГТГ для різних халькогенідів. Ця властивість  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$  дає можливість використовувати її при розробці передових оптоелектронних пристроїв.

**Висновки.** Дослідження нелінійно-оптичних властивостей третього порядку в сполуках  $\text{TlInGe}_2\text{S}_6$  та  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$  показали, що генерація третьої гармоніки чутлива для зовнішнього фотоіндукуючого опромінення, що дає матеріалу унікальні властивості, а саме можливість керувати величиною ГТГ за допомогою фотоіндукуючого випромінювання. Отже, для кристалів  $\text{TlInGe}_2\text{S}_6$  та  $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$  спостерігається рідкісна можливість модулювати

інтенсивність сигналу ГТГ, що дозволяє розглядати ці сполуки як новий тип нелінійно-оптичних лазерних модуляторів.

#### Інформаційні джерела

1. Малаховська Т. О. / Патент України на корисну модель № 43564, МПК (2009) H01L 35/12. Термоелектричний матеріал / Малаховська Т. О., Сабов М. Ю., Переш Є. Ю., Галаговець І. В., Беца В. В. – № u200901946; заяв. 04.03.09; опубл. 25.08.09, Бюл. № 16. – 3 с.
2. Thallium indium germanium sulphide (TlInGe<sub>2</sub>S<sub>6</sub>) as efficient material for nonlinear optical application / O. Y. Khyzhun, V. S. Babizhetskyy, I. V. Kityk [et al.] // J. Alloys Comp. 2018. V. 735. P. 1694–1702.
3. Novel quaternary TlGaSn<sub>2</sub>Se<sub>6</sub> single crystal as promising material for laser operated infrared nonlinear optical modulators / O. V. Parasyuk, V. S. Babizhetskyy, O. Y. Khyzhun [et al.] // Crystals. 2017. V. 7(341). DOI: 10.3390/cryst7110341.
4. New quaternary thallium indium germanium selenide TlInGe<sub>2</sub>Se<sub>6</sub>: crystal and electronic structure / O.Y. Khyzhun, O.V. Parasyuk, O.V. Tsisar [et al.] // J. Sol.State. Chem. 2017. V. 254. P. 103–108.

**Цісар О. В.** к.х.н., **Пискач Л. В.** к.х.н., доц., **Мирончук Г.Л.**, к.ф.м.н., доц., **Китык І.В.** д.ф.м.н., проф.  
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинский

#### НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ Tl<sup>III</sup>D<sup>IV</sup>X<sub>6</sub>

*В данной работе проведено исследование фотоиндуцированной генерации третьей гармоники в соединениях Tl<sup>III</sup>D<sup>IV</sup>X<sub>6</sub>. Для фотоиндуцированного возбуждения были использованы различные типы лазеров с одинаковой мощностью: ГДГ Nd: YAG лазера (532 нм), фундаментальный луч Nd: YAG лазера (1064 нм) и ИК-микросекундный CO<sub>2</sub> лазер с длиной волны 9400 нм. Установлено, что для кристаллов TlInGe<sub>2</sub>S<sub>6</sub> и TlGaSn<sub>2</sub>Se<sub>6</sub> наблюдается возможность модулировать интенсивность сигнала ГТГ, что позволяет рассматривать эти соединения как новый тип нелинейно-оптических лазерных модуляторов.*

**Ключевые слова:** нелинейная оптика, лазер, генерация третьей гармоники.

**Tsisar O.V., Piskach L. V., Myronchuk G. L., Kityk I.V.**  
Lesya Ukrainka Eastern European National University

#### NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF COMPOUNDS Tl<sup>III</sup>D<sup>IV</sup>X<sub>6</sub>

*In this paper, we studied the photoinduced generation of the third harmonic in Tl<sup>III</sup>D<sup>IV</sup>X<sub>6</sub> compounds. For photoinduced excitation, different types of lasers with the same power were used: the SHG Nd: YAG laser (532 nm), the fundamental beam of the Nd: YAG laser (1064 nm) and the IR microsecond CO<sub>2</sub> laser with a wavelength of 9400 nm. It has been found that for TlInGe<sub>2</sub>S<sub>6</sub> and TlGaSn<sub>2</sub>Se<sub>6</sub> crystals, the ability to modulate the THG signal intensity is observed, which allows us to consider these compounds as a new type of nonlinear-optical laser modulators.*

**Keywords:** nonlinear optics, laser, third harmonic generation.

УДК 621.9.02(07)

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-26>

Швець С. В., к.т.н.

Сумський державний університет

### ВПЛИВ СХЕМИ РІЗАННЯ ТА МЕТОДУ ФОРМОУТВОРЕННЯ НА КОНСТРУКЦІЮ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА

*У процесі різання вирішуються дві задачі – видалення припуску та формування поверхні деталі з необхідними параметрами якості. Це вимагає визначення схеми різання і методу утворення поверхні деталі. На цей час у літературі немає однозначного визначення цих понять. В роботі, в першу чергу, приділена увага цій проблемі. Також показано, що вихідна інструментальна поверхня може бути реальною поверхнею, яка обмежує калібрувальну частину інструмента і на якій знаходяться формуючі різальні кромки або їх ділянки, що контактують з поверхнею деталі. А може утворюватися рухами різальних кромок у просторі, тобто кінематично. Припуск може розділятися на шари поверхнями, що огортають поверхню деталі з наступним подрібненням кожного такого шару, або поверхнями, які перетинають поверхню деталі з подальшим розділенням їх на стружку. Методів формоутворення лезовим інструментом також може бути два. Це або лінійний контакт, або точковий. Схеми різання і методи формоутворення у поєднанні з відносними рухами інструмента і деталі та уявою інженера-конструктора створюють широкі можливості для утворення різних видів і типів різальних інструментів.*

**Ключові слова:** *схема, метод, формоутворення, припуск, деталь, контакт, лезо*

**Вступ.** Термін «проекування» різального інструмента має два значення. По-перше, це вибір певного виду інструмента із наявного ряду для забезпечення потреб технологічного процесу. З іншого боку, він може означати створення такого інструменту, якого ще немає і не було [1–3].

У першому випадку йдеться про вибір виду і типу інструмента, його конструктивних параметрів, про якість калібрувальної частини та інструментальний матеріал [4, 5]. Тобто, про здатність певного виду інструмента забезпечити якість і точність обробленої поверхні деталі при найменшій собівартості процесу.

У другому випадку вирішується задача створення нового, не існуючого інструмента [4], або аналізу чи вдосконаленню умов формоутворення. При цьому доцільно утворення поверхні деталі розглядати як функціонування деякого механізму, що складається із двох ланок: поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні [5]. Відносний рух цих ланок такий, що вихідна інструментальна поверхня повинна торкнутися кожної точки поверхні деталі. Отже, вихідна інструментальна поверхня, рухаючись по заданій траєкторії формує поверхню деталі. Якщо відомі поверхня деталі і траєкторія відносного (формує) руху, то є можливість вибудувавши іншу ланку, вихідну інструментальну поверхню, перетворити її на різальний інструмент.

Отже, необхідно дослідити вплив методу формоутворення і схеми різання на конструкцію різального інструмента. При цьому у літературі немає однозначного визначення цих понять, які можна застосувати до всіх інструментів [6–10]. Визначення одинарної чи групової схеми різання для протяжки не можливо застосувати до переважної кількості інших інструментів. Те саме відбувається і з профільним чи генераторним методом формоутворення.

Мета роботи – вдосконалення визначень схеми різання та методу формоутворення та дослідження їх впливу на конструкцію різального інструмента.

#### **1. Визначення схеми різання і методу формоутворення**

Робота різального інструменту полягає у видаленні з заготовки якоїсь частини матеріалу (припуску) з метою утворення необхідної форми поверхні деталі. Тому у процесі різання вирішуються дві задачі. Перша полягає у поборюванні опору руйнуванню матеріалу заготовки та забезпечення тривалості цього процесу відповідно до економічної доцільності (взаємодія із припуском). Друга – це формування поверхні деталі з необхідними параметрами якості. Ці задачі, що виникають перед різальним інструментом, вказують на наявність схем різання і методів утворення поверхонь деталей.

Схема різання показує в якій послідовності припуск подрібнюється на стружку [11]. За першою схемою його можна видаляти шарами з поверхнями за формою наближеними до

форми поверхні деталі (огортають її), з наступним розділенням на більш мілкі елементи. А можна (друга схема) припуск спочатку розрізувати поверхнями, які перетинають поверхню деталі, і тільки потім утворені об'єми подрібнювати на стружку. Отже, можуть бути дві схеми різання.

Метод утворення поверхні вказує на те яким геометричним примітивом формується поверхня деталі [1]. Поверхня деталі може створюватися точкою, лінією або поверхнею. При використанні лезового різального інструмента, коли поверхня деталі утворюється у результаті видалення подрібненого припуску, формоутворення поверхні деталі можливе точкою або лінією.

Умовно можна вважати, що формоутворення поверхнею може відбуватися при використанні абразивного інструмента, якщо припустити, що видалення припуску відбувається завдяки взаємодії матеріалу заготовки з суцільною поверхнею інструмента, що утворена великою кількістю абразивних зерен-різців. Формоутворення поверхнею можливе при інших видах обробки, таких як: виливання, штампування, електроерозія.

## **2. Ланки механізму формоутворення**

Отже, є дві схеми різання і два методи формоутворення, але при цьому існує велика кількість видів і типів різальних інструментів.

Вихідна інструментальна поверхня обмежує калібрувальну частину інструмента. Якщо різальна і калібрувальна частини чітко розмежовуються, то схема різання впливає на конструкцію різальної частини, а метод формоутворення - калібрувальної. Це не стосується інструментів у яких робоча частина на різальну і калібрувальну не поділяється. Наприклад, циліндрична фреза. Вихідна інструментальна поверхня циліндричної фрези із гвинтовим зубом це круговий циліндр, утворений рухом різальної кромки по колу. Але в кожний момент часу цей інструмент з поверхнею деталі має точковий контакт.

Основні види інструментів складають деяку множину

$$W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8, W_9\},$$

де  $W_1$  - різці;  $W_2$  - протяжки;  $W_3$  - фрези;  $W_4$  - свердла;  $W_5$  - зенкери;  $W_6$  - розвертки;  $W_7$  - мітчики;  $W_8$  - плашки;  $W_9$  - зуборізний інструмент.

Чіткої межі між ними не існує. Різні види інструментів об'єднуються у групи, утворюючи немов би новий вид. Так говорять про зуборізний інструмент, до складу якого входять різці, фрези, протяжки і притаманні тільки обробці зубчастих коліс довбачі. Для нарізування різі використовуються різці, фрези, мітчики, плашки. Свердло, оснащене багатогранною непереточуваною пластиною загального призначення, може використовуватися як розточувальний різець. Тому види поділяються на типи, які, завдяки вдосконаленню виробництва, змінюються та розвиваються.

У процесі утворення деталі значний внесок належить рухам. При необхідності рух є складовою утворення вихідної інструментальної поверхні (його можна назвати допоміжним), а коли вихідна інструментальна поверхня утворена її рух відносно поверхні деталі є формоутворюючим.

Вихідна інструментальна поверхня може мати таку траєкторію, що множина ліній контакту послідовно формує поверхню деталі, а може її рух імітувати рух парної деталі, яка має контактувати з оброблюваною деталлю в майбутньому вузлі машини.

Досить часто прості рухи, такі як прямолінійно-поступальний і обертальний, відтворюються конструктивно. Наприклад, обертання навколо своєї осі черв'ячної фрези, завдяки гвинтовій поверхні черв'яка, створює ситуацію поступального руху рейки відносно колеса при його обертанні.

Обертання циліндричної фрези з гвинтовими зубами переміщує точку контакту вздовж осі фрези утворюючи, при точковому контакті, кінематичну характеристику. Контакт між ланками механізму формоутворення лінійний, і ця лінія - характеристика. Але, як зазначено вище, маємо два методи утворення поверхні деталі різальним інструментом – лінією і точкою. Тоді, для дотримання умов формоутворення при точковому контакті, характеристика створюється кінематично [12].

Формоутворююча точка або лінія (різальна кромка) розміщуються на вихідній інструментальній поверхні.

Вихідна інструментальна поверхня може бути відтворена геометрично у вигляді поверхні, яка обмежує калібрувальну частину інструмента і на якій знаходяться формоутворюючі різальні кромки або їх точки, що контактують з поверхнею деталі. А може

утворюватися різальними кромками (навіть простими за формою) чи їх точками за складних додаткових їх рухів у просторі, тобто, як і характеристика, кінематично.

Якщо характеристика і вихідна інструментальна поверхня кінематичні, то для їх створення потрібні додаткові рухи. Механізм формоутворення складається із вихідної інструментальної поверхні, поверхні деталі та їх відносного руху, руху формоутворення.

Отже, рухи поділяються на формоутворюючі і на допоміжні, такі, які створюють кінематичну вихідну інструментальну поверхню.

Тому і схема різання, і метод утворення поверхні впливають на конструкцію різального інструмента. Але, крім цього, важливе значення мають траєкторії рухів цих геометричних примітивів (точки або лінії), які формують поверхню деталі.

### 3. Схеми різання і методи формоутворення при використанні різних видів інструментів

3.1 При точінні прохідний різець здійснює точковий контакт (рис. 1 а), вихідна інструментальна поверхня при цьому утворюється кінематично. Її можна уявити як циліндр, що насувається на поверхню деталі [12]. Тобто, вона залежить від обертального,  $D_r$ , і поступального рухів,  $D_s$ . А можна уявити і як площину, в якій в кожний момент часу лежать вектор швидкості обертального руху,  $V_r$ , і вектор швидкості поступального,  $V_s$ .

Відрізувальний і підрізувальний різці (рис. 1 б, в) контактують з поверхнею деталі в точці [7 – 9]. Вихідна інструментальна поверхня утворюється завдяки рухові вершини різця по спіралі. Утворення поверхні деталі можна уявити як обертання по колу прямої лінії, що утворюється прямолінійним рухом вершини різця до осі деталі.

Причому, якщо при використанні прохідного різця вихідна інструментальна поверхня може бути утворена як обертанням прямої лінії по колу, так і рухом кола вздовж прямої лінії,

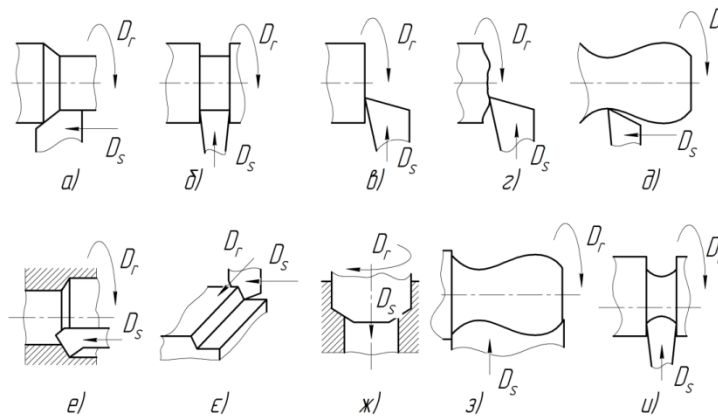


Рис. 1. Формоутворення точкою та лінією

то у випадку з відрізним чи підрізним різцями вона можлива тільки при русі точки по спіралі. Тобто утворюється поверхня (площина), в якій лежать вектори швидкостей обертального і поступального рухів.

Точіння фасонного торця (рис. 1 з) можливе при змінюванні напрямку вектора швидкості руху подачі.

Точіння поверхні, показаної на рис. 1 д, можна розглядати як насування еластичної вихідної інструментальної поверхні на поверхню деталі. У цьому випадку вона утворюється завдяки незмінному рухові подачі,  $D_s$ , і змінюваній траєкторії обертання,  $D_r$ . Проте, її можна уявити і як поверхню, до якої в кожний момент часу дотичні вектори швидкостей обертального,  $V_r$ , і поступального,  $V_s$ , рухів.

Отже, у всіх розглянутих випадках, спільним є те, що при точковому контакті існує кінематична вихідна інструментальна поверхня, залежна від координат векторів швидкостей обертального і поступального рухів у кожній її точці і збігається з поверхнею деталі.

Це стосується також і розточування (рис. 1 е), свердління, зенкування і розвертування (рис. 1 ж).

При струганні (рис. 1 є) обертальний рух перетворюється на прямолінійний,  $r \rightarrow \infty$ , тому поверхня обертання перетворюється на площину.

При роботі фасонного різця (рис. 1 з) маємо реальну вихідну інструментальну поверхню. При лінійному контакті, а саме так через різальну кромку контактує з поверхнею



деталі фасонний різець, одна із її координатних ліній уже існує. Тобто, коли є твірна, конструктор задає форму напрямної (коло чи пряма лінія) і утворюється реальна вихідна інструментальна поверхня круглого чи призматичного різця.

При лінійному контакті форма лінії контакту (твірної вихідної інструментальної поверхні) визначається формою поверхні деталі та бажаною орієнтацією у просторі. Напряму призначає конструктор. Тому це реальна поверхня, її параметри від рухів у процесі утворення деталі не залежать.

Канавочний різець (рис. 1 *и*) має дві вихідні інструментальні поверхні – реальну і кінематичну. По дну канавки відбувається лінійний контакт, а на бічних поверхнях – точковий.

Щоб спроектувати різальний інструмент на підставі визначення вихідної інструментальної поверхні необхідно визначити її координатні лінії. При лінійному контакті одна із цих ліній і є твірною, а напряму пропонує конструктор. Якщо реально існує одна із координатних ліній, то утворюється реальна вихідна інструментальна поверхня. У випадку точкового контакту, координатні лінії утворюються кінематично, тому створюється можливість утворення безлічі форм вихідної інструментальної поверхні (табл.1). Тобто функціонального зв'язку між формами поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні не існує. І це вказує на великі можливості в конструюванні різальних інструментів.

3.2 При фрезеруванні (рис. 2 *а, б, в*) припуск розподіляється на стружку поверхнями, що перетинають поверхню деталі. Іноді, для більшого подрібнення і таких утворених стружок, на різальних кромках створюють стружкоподільні канавки. Така послідовність видалення припуску вказує на другу схему різання.

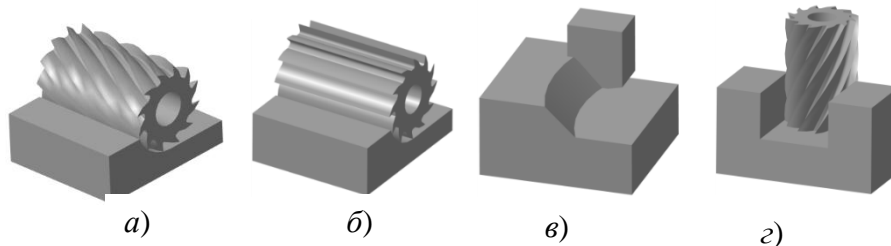


Рис. 2. Схеми різання та умови контакту при фрезеруванні

Стосовно методу утворення поверхні, то циліндричні фрези із гвинтовими зубами мають точковий контакт з поверхнею деталі (рис. 2 *а*), а з прямими – лінійний (рис. 2 *б*). У цих фрез повністю збігається форма вихідної інструментальної поверхні (циліндр), але, залежно від форми різальної кромки, змінюються умови контакту, тобто метод формоутворення.

Торцева фреза (рис. 2 *в*) контактує з поверхнею деталі площиною, яка утворюється точковим контактом вершин її зубів.

Кінцева фреза (рис. 2 *г*) поєднує в собі схеми зрізування припуску і методи утворення поверхні циліндричної і торцевої фрези, тому що частина її вихідної інструментальної поверхні циліндр, а частина – площина.

Дискова фреза при відрізуванні має точковий контакт і відтворює другу схему різання.

3.3 Відомо, що схема зрізування шарів при роботі протяжки істотно впливає на конструкцію різальної частини інструменту і на його стійкість [6, 13 – 17]. Схема показує, яким чином і у якій послідовності весь припуск розподіляється між зубами протяжки. Припуску при протягуванні максимально зрізується чорною секцією, тому конструктивні особливості переважно стосуються сама її.

Існують дві схеми. Перша, коли припуск розподіляється по шарам рівномірно між усіма зубами, а потім кожний шар подрібнюється стружкоподільними канавками (рис. 3 *а*). Поверхні, що розмежовують шари, огортають поверхню деталі. Така схема має назву «одинарна схема різання».

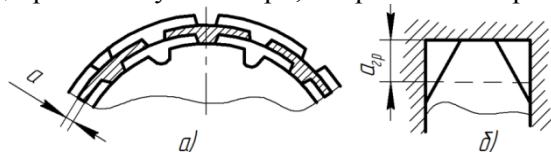


Рис. 3. Схеми різання при протягуванні

Друга – передбачає подрібнення шару товщиною  $a_{зр}$  (рис. 3 *б*) на стружку поверхнями, що перетинають поверхню деталі. При цьому  $a_{зр}$  це тільки частина припуску, яка зрізується групою зубів. Звичайно у групі два або три зуби. Може бути чотири і більше, але все залежить від умов

стружкоутворення і велика кількість зубів у групі використовується рідко. Проходить 1-й зуб групи, за ним 2-й і т. д. Така схема дістала назву «групова схема різання».

Відповідно конструкції протяжок групового і одинарного різання відрізняються. Навіть одна і та сама схема різання для одного виду інструмента може бути реалізована завдяки різним конструктивним рішенням (табл.1).

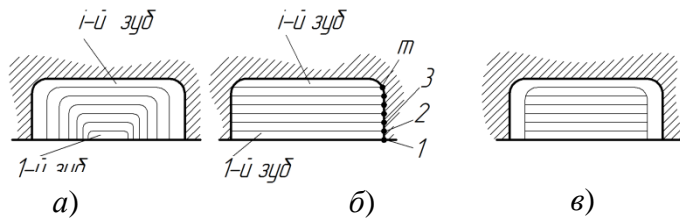


Рис. 4. Методи утворення поверхонь при протягуванні

При протягуванні може реалізуватися лінійний контакт (профільний метод) або точковий (генераторний метод). Звичайно лінійний контакт (рис. 4 а) дозволяє отримати більш якісну поверхню, точковий (рис. 4 б) – підвищити стійкість інструмента. Через це, іноді комбінують методи (рис. 3 в).

Калібрувальна секція відділяє шари поверхню, що збігається з поверхнею деталі. Тому це і є вихідна інструментальна поверхня. Рухаючись у заданому напрямі вона, завдяки розміщеним на ній різальним кромкам, формує поверхню деталі. Характеристика реальна, відповідає різальній кромці зуба калібрувальної секції.

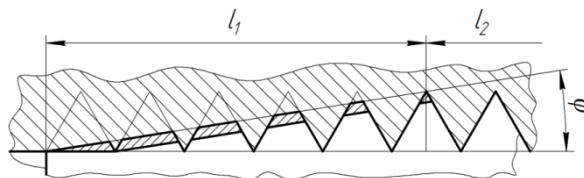


Рис. 5. Схема формоутворення мітчиком

поверхні – лінійний (табл.1). Так само формується поверхня різі і при роботі плашки.

3.5 При нарізуванні конічних коліс з круговими зубами (рис. 6) відтворюється відповідна передача. Метод базується на принципі обкочування заготовки по твірному колесі [1], зубом якого є різець голівки, що формує западину на заготовці.

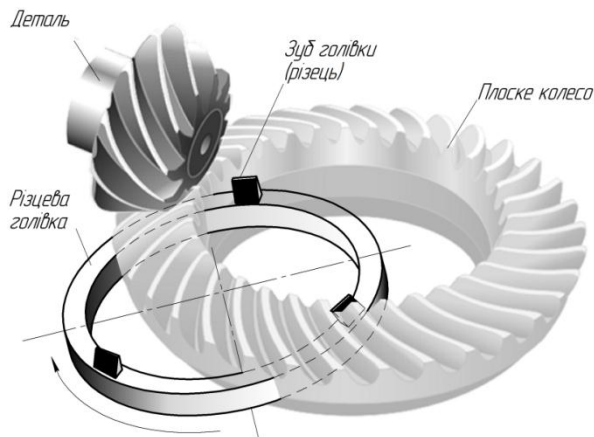


Рис. 6. Схема нарізування конічних коліс з круговим зубом

3.4 При роботі мітчика припуск різальною частиною з кутом  $\varphi$  (в межах  $l_1$ , рис. 5) розділяється послідовно поверхнями, що перетинають поверхню деталі. Це вказує на другу схему різання. На калібрувальній частині,  $l_2$ , різальні кромки, які відповідають профілю різі, повністю контактують з поверхнею деталі. Отже метод утворення

поверхні – лінійний (табл.1). Так само формується поверхня різі і при роботі плашки.

3.5 При нарізуванні конічних коліс з круговими зубами (рис. 6) відтворюється відповідна передача. Метод базується на принципі обкочування заготовки по твірному колесі [1], зубом якого є різець голівки, що формує западину на заготовці.

Профіль зуба деталі утворюється як обвідна послідовних положень прямолінійного профілю різця. Огинання здійснюється за рахунок погодженого обертання заготовки та уявного твірного колеса. Роль твірного колеса у зуборізному верстаті відіграє спеціальна люлька, по напрямній якої переміщається різцева голівка.

Вихідна інструментальна поверхня, це парне колесо до конічного колеса з круговими зубами. Профіль зуба деталі утворюється як обвідна послідовних положень прямолінійного профілю різця. Тобто, маємо точковий контакт різального інструмента з поверхнею деталі (табл.1).

Тому для утворення лінійного контакту (характеристики) використовується кругова подача (обкочування). Цей кінематично утворений профіль розповсюджується на усю поверхню зуба конічного колеса завдяки обертальному руху голівки зі швидкістю різання.

Форма різальної кромки різця впливає на координати точок контакту різального інструмента з поверхнею деталі, тобто на профіль зуба деталі, а частота обертання голівки на щільність траєкторій формотвірних точок, тобто на якість обробленої поверхні.

Вихідна інструментальна поверхня утворюється точками відповідної форми різальної кромки різця завдяки узгодженим обертальним рухам умовного парного колеса та заготовки і незалежного обертального руху різцевої голівки.

Таблиця 1

Вплив виду і типу інструмента на схему різання і умови контакту з поверхнею деталі (метод формоутворення)

Інструмент		Схе- ма різан- ня		Кон- такт		Харак- терис- тика			Вихід- на інстру- ментальна поверхня		Голов- ний рух різан- ня		Рух подачі	
Вид	Тип	1	2	точковий	лінійний	реальна	кінема- тична	реальна	кінема- тична	оберталь- ний	посту- пальний	оберталь- ний	посту- пальний	
Різці	обточувальні		x	x			x		x	x			x	
	розточувальні		x	x			x		x	x			x	
	фасонні	x			x	x		x		x			x	
Фрези	циліндрична прямозуба		x		x			x		x			x	
	циліндрична косозуба		x	x			x	x		x			x	
	торцева		x	x			x	x		x			x	
	кінцева	x	x	x	x		x	x		x			x	
	дискова		x	x			x	x		x			x	
Протяжки	одинарна	x			x	x		x			x		x	
	групова		x	x			x	x			x		x	
Свердла			x	x			x	x		x			x	
Зенкери			x	x			x	x		x			x	
Розвертки			x	x			x	x		x			x	
Різенарізу- вальні	плашка		x		x		x	x		x			x	
	мітчик		x		x		x	x		x			x	
	голівка для вихрового фрезерування		x		x		x		x	x		x	x	
Зубонарі- зувальні	дискова фреза		x		x	x		x		x			x	
	зубодовбальна голівка		x		x	x		x			x		x	
	довбач	x		x		x		x			x	x		
	червячна фреза	x		x		x		x		x				
	система для конічних коліс з круговим зубом	x			x		x		x	x		x		
	система для конічних коліс з прямим зубом	x		x			x		x		x	x		

3.6 Нарізування конічних прямозубих коліс відбувається на зубостругальних верстатах. У процесі нарізування зуб заготовки обробляється з двох сторін за допомогою двох зуборізних різців (рис. 7). За твірне тут прийнято парне колесо.

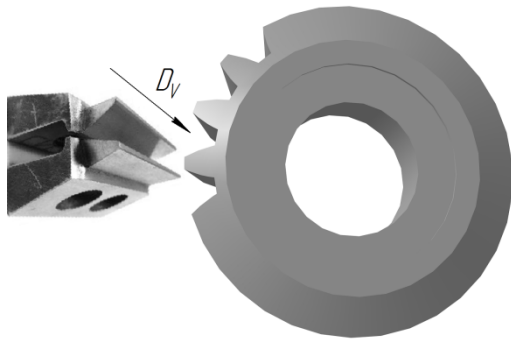


Рис. 7. Схема нарізування конічних прямозубих коліс

При нарізуванні конічних коліс з прямими зубами використовуються різці, що рухаються по прямолінійній траєкторії і мають точковий контакт з поверхнею деталі. Вихідна інструментальна поверхня, це поверхня парного колеса. Точки різальних кромки різців, завдяки кінематичній імітації обточування, утворюють профіль зуба деталі (твірну), а прямолінійний рух різців вздовж поверхні зуба деталі утворює напрямну його поверхні.

При точковому контакті різального інструмента з поверхнею деталі твірна поверхні деталі в обох випадках утворюється узгодженим обертальними рухами, а напрямна – залежно від

напрямку зубів (табл.1).

Отже, вихідна інструментальна поверхня утворюється залежно від методу утворення поверхні деталі (контакт лінійний чи точковий). Якщо контакт лінійний, то тоді характеристика (різальна кромка) сприймається як твірна і далі необхідно запропонувати форму напрямної. Круглий фасонний різець: твірна – різальна кромка, напрямна – коло. Призматичний фасонний різець: твірна – різальна кромка, напрямна – пряма лінія. Протяжка: твірна – різальна кромка, напрямна пряма лінія у лінійних протяжках і коло у кругових.

Схема різання навіть змінює тип інструмента. Так послідовне розподілення припуску між чорновими зубами протяжки з наступним розрізуванням кожного шару стружкоподільними канавками, утворює одинарну протяжку, а заглиблення у припуск на однакову задану глибину групи зубів з наступним розділенням об'єму метала між зубами групи по ширині – групову.

**Висновки.** Схема різання визначає послідовність перетворення припуску на стружку. Їх може бути дві. Припуск може розділятися на шари поверхнями, що огортають поверхню деталі з наступним подрібненням кожного такого шару – перша схема. Друга схема передбачає поділення припуску на шари поверхнями, які перетинають поверхню деталі з подальшим розділенням їх на стружку. При роботі лезового інструмента методів формоутворення також може бути два. Метод формоутворення визначає умови контакту різальної кромки з поверхнею деталі. Якщо вона повністю контактує з поверхнею деталі, то це буде лінійний метод формоутворення. Якщо контакт відбувається на невеличкій ділянці різальної кромки, то це точковий метод формоутворення. На цей час більшість різальних інструментів працюють за другою схемою різання (табл. 1). Першу схему різання використовує фасонний різець, одинарна протяжка і зубообробний інструмент, який імітує обточування.

Вихідна інструментальна поверхня може бути реальною поверхнею, а може створюватися кінематично. Більшість видів різальних інструментів мають реальну вихідну інструментальну поверхню на якій знаходяться формоутворюючі кромки або точки (за винятком обточувальних і розточувальних різців, та складних механізмів: голівка для вихрового нарізування різі, системи для нарізування конічних коліс).

Вибір схеми різання і методу формоутворення з урахуванням рухів інструмента відносно поверхні деталі впливає на конструкцію різального інструмента. При цьому може використовуватися в якості вихідної інструментальної поверхні реальна поверхня або створена кінематично. Це розширює можливості при визначенні остаточних конструкцій різального інструмента. Визначення форми вихідної інструментальної поверхні (реальної чи кінематичної) не дає однозначного вирішення щодо конструкції різального інструмента. Після її визначення настає евристичний етап роботи конструктора.

Дві схеми різання і два методи формоутворення у поєднанні з відносними рухами інструмента і деталі та уявою інженера-конструктора створюють широкі можливості для утворення різних видів і типів різальних інструментів.

#### Інформаційні джерела:

1. Семенченко И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. – Москва: Машгиз, 1963. – 949 с.

2. Bouzakis K.-D. A Critical Review of Characteristic Techniques for Improving the Cutting Performance of Coated Tools / K.-D. Bouzakis, G. Skordaris, E. Bouzakis, T. Kotsanis, P. Charalampous. – Journal of Machine Engineering, Vol. 17, No. 2, 2017. – Pp. 25 – 44.
3. Nee J. Fundamentals of Tool Design, SME, 2017 – 464 pp.
4. Matuszak J. Computer aided design of cutting tools / J. Matuszak, M. Barszcz. – Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 9, No. 28, 2015. – Pp 107–111.
5. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р.Родин. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.
6. Кукляк М.Л. Металорізальні інструменти. Проектування / М.Л. Кукляк, І.С. Афтаназів, І.І. Юрчишин – Львів: Львівська політехніка, 2003. – 556 с.
7. Pavani P. N. L. Experimental Study & Optimization of Machining Parameters in Turning of AISI 1040 Steel with Micro-grooved WC Cutting Tools / P. N. L. Pavani, C. L. V. R. S. V. Prasad, K. Ramji. – Engineering Journal Volume 21 Issue 4, 2017. – Pp. 155–169.
8. Chudy R. Investigation of sequential machining processes in terms of power consumption and surface quality / R. Chudy, W. Grzesik. – Journal of Machine Engineering, Vol. 16, No. 3, 2016. – Pp. 67– 74.
9. Brecher Ch. Increasing productivity of cutting processes by real-time compensation of tool deflection due to process forces / Ch. Brecher, A. Wetzel, Th. Berners, A. Epple. – Journal of Machine Engineering, 2019, Vol. 19, No. 1. – Pp. 16 –27.
10. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / А. Л. Воронцов, А. Ю. Албагачиев, Н. М. Султан-заде. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 552 с.
11. Лашнев С. И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами / С.И.Лашнев, А.Н.Борисов, С.Г.Емельянов; под ред. Лашнева С.И. –Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1997. – 391 с.
12. Швець С.В. Характеристика та вихідна інструментальна поверхня у процесі формоутворення // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 162-167.
13. Щеголев А. В. Конструирование протяжек / А. В. Щеголев – Ленинград: Машгиз, 1960. – 352 с.
14. Маргулис Д. К. Протяжки для обработки отверстий / Д. К. Маргулис, М.М. Тверской, В. Н. Ашихмин и др. – Москва: Машиностроение, 1986. – 232 с.
15. Akula M. Design and analysis of broach tool for splines / Malyadri Akula, K.Chandra Sekhar, A. Nagendra. – International Journal of Advanced Engineering Technology, vol. IV, 2013. – Pp. 06 – 08.
16. Vogtel P. Automatic Broaching Tool Design by Technological and Geometrical Optimization / P. Vogtel, F. Klocke, D. Lung, S. Terzi. – Procedia CIRP 33, 2015. – Pp. 496 – 501.
17. Vogtel P. Modelling of process forces in broaching Inconel 718 / P. Vogtel, F. Klocke, H. Puls, S. Buchkremer, D. Lung. – Procedia CIRP 8, 2013. – Pp. 409 – 414.

**Швец С. В., к.т.н.**

Сумский государственный университет

### **ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ И МЕТОДА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА КОНСТРУКЦИЮ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*В процессе резания решаются две задачи - удаление припуска и формирование поверхности детали с необходимыми параметрами качества. Это требует определения схемы резания и метода образования поверхности детали. В настоящее время в литературе нет однозначного определения этих понятий. В работе, в первую очередь, уделено внимание этой проблеме. Также показано, что исходная инструментальная поверхность может быть реальной поверхностью, которая ограничивает калибровальную часть инструмента и на которой находятся формообразующие режущие кромки или их участки, контактирующие с поверхностью детали. А может образовываться движениями режущих кромок в пространстве, то есть кинематически. Припуск может разделяться на слои поверхностями, окутывающими поверхность детали с последующим измельчением каждого такого слоя, или поверхностями, которые пересекают поверхность детали с последующим разделением их на стружку. Методов формообразования лезвийным инструментом также может быть два.*

*Это либо линейный контакт, либо точечный. Схемы резания и методы формообразования в сочетании с относительными движениями инструмента и детали и воображением инженера-конструктора создают широкие возможности для образования различных видов и типов режущих инструментов.*

**Ключевые слова:** *схема, метод, формообразование, припуск, деталь, контакт, лезвие*

**Shvets S. V., Ph.D.**

Sumy State University

#### **INFLUENCE OF CUTTING SCHEME AND METHOD OF FORMATION ON THE DESIGN OF THE EDGE TOOL**

*In the process of cutting two problems are solved - removal of the lowering and forming of the surface of the part with the necessary quality parameters. This requires the definition of the cutting scheme and the method of forming the surface of the part. At this time in the literature there is no definite definition of these concepts. In the work, first of all, attention is paid to this problem. It is also shown that the original tool surface may be a real surface that restricts the calibration part of the tool and which is shaping cutting edges or their parts that come in contact with the surface of the part. And it can be formed by the movements of the cutting edges in space, that is, kinematically. The allowance can be divided into layers by surfaces that cover the surface of the part with the subsequent shredding of each such layer, or surfaces that cross the surface of the part, then dividing them into chips. Methods of shaping a blade tool can also be two. This is either a linear contact, or a point. Schemes of cutting and methods of forming together with the relative movements of the tool and the details and imagination of the design engineer create wide opportunities for the formation of different types and types of cutting tools.*

**Key words:** *scheme, method, formation, release, detail, contact, blade*

УДК 621.3.049.77

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-27>

Шипелик Ю.П., Федосов С.А., д.ф.-м.н.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

**МЕТОДИКИ ТА ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАННЯ ІОНІЗАЦІЇ ТА ЇХ ПРОБЛЕМАТИКА**

У роботі описуються особливості вимірювання концентрації заряджених частинок у повітрі (іонів). Розглядається використання аспіраційного конденсатора в якості модельного датчика для вимірювання розподілу іонізованих частинок. Запропоновано технічні рішення побудови приладу та шляхи коректного обрахунку результатів розподілу іонів різної рухливості, встановлено переваги та недоліки. Робота переслідує мету розв'язання науковцями проблемних питань з вимірювання потоку іонів та можливі шляхи їх усунення.

**Ключові слова:** іонізація, іони, аспіраційний конденсатор, відхиляючий електрод, вимірювальний електрод, аспіраційна камера.

**Вступ.** Іонізація – перетворення електричнонейтральних частинок середовища на заряджені. Іонізація газів – відщеплення від атомів (молекул) газу одного або кількох електронів, а також приєднання вільних електронів до деяких нейтральних атомів (молекул), завдяки чому виникають позитивні й негативні іони та вільні електрони і газ стає провідником електричного струму. Відбувається під дією ультрафіолетового, X- й гамма-випромінювання внаслідок ударів прискорених електронів та іонів, при високій температурі та ін. Іонізація атмосфери, що відбувається під впливом зовнішніх факторів, призводить до утворення іоносфери. У повітрі під впливом електричних полів можуть утворюватися легкі, середні й важкі іони. До легких належать іони кисню, яким властива висока швидкість ( $1 \div 2$  см/с за напруженості електричного поля 1 В/см). Важкі іони – це наелектризовані мікрочастинки пилу, диму тощо. Швидкість їхнього руху становить  $\approx 0,001$  см/с. Джерелами природної іонізації повітря (аероіонізації) є ультрафіолетове випромінювання Сонця, космічне проміння, електричні розряди в атмосфері, радіоактивні випромінювання та ін. За нормальних умов атоми, молекули газів, вологи та інших частинок електричнонейтральні. Під впливом зовнішніх фізичних чинників від молекул відриваються електрони і рівновага порушується – утворюється нестабільні позитивні легкий іон та вільний електрон, які у свою чергу взаємодіють з молекулами повітря, утворюючи стабільні легкі іони. Процесами іонізації повітря можна пояснити запах моря, гірського повітря, хвойного лісу, грозового розряду тощо. Звичайна концентрація негативних аероіонів у повітрі становить  $1\ 000 \div 10\ 000$  іонів/см<sup>3</sup>, у кімнаті –  $400 \div 1\ 000$ . Іони, утворені в повітрі, потрапляють до живого організму через дихання, осідаючи на частинках водяної пари, вони (вже у вигляді важких іонів) заряджають стінки трахеї, бронхів та бронхіол. Біологічну й фізіологічну дію аероіонів на здоров'я людини відкрив у 1919 р. російський біофізик О.Чижевський, який встановив, що для оптимального обміну речовин у повітрі має бути певна кількість від'ємних іонів кисню, та з'ясував, що від'ємні аероіони сприятливо впливають на всі функції, тоді як позитивні – негативно [1]. Розроблена ним методика генерації зазначених іонів за допомогою іонізаторів набула практичного застосування у медицині та сільському господарстві. Процеси іонізації застосовують у детекторах іонізуючого випромінювання під час контролю забруднення повітря та води, оцінювання якості й безпеки харчових та сільськогосподарських продуктів. Тому питання методики та техніки вимірювання іонізації має велике практичне значення і потребує вдосконалень у розрізі уникнення факторів, що спричиняють великі похибки даних вимірювань та коректної оцінки результатів досліджень.

**Викладення основного матеріалу.**

**Модель аспіраційного конденсатора.** Фізична модель вимірювання концентрації іонів полягає у наступному (рис. 1). На зовнішню обкладку циліндричного конденсатора подають так званий відхиляючий потенціал, а з внутрішньої обкладки знімають сигнал [2]. Наявність заряджених частинок у повітрі формує струм між зовнішнім і внутрішнім електродом. Цей струм вимірюють і він характеризує кількісні показники іонізованого повітря. Даний метод називається методом аспіраційного конденсатора.

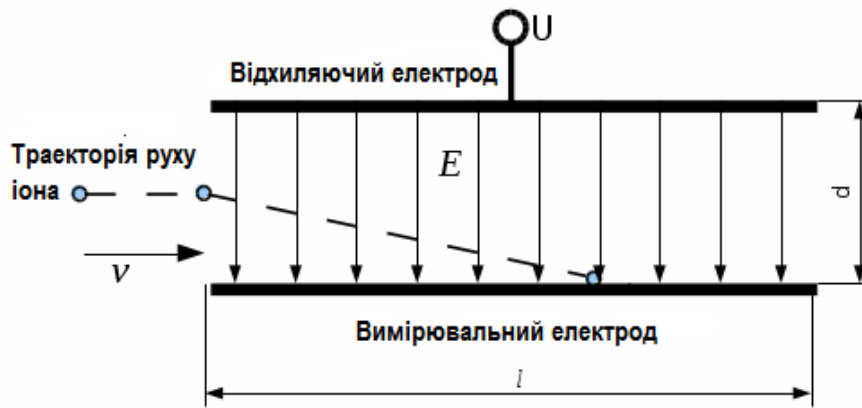


Рис. 1. Спрощена схема аспіраційного конденсатора

Конденсатор має довжину  $l$  відстань між пластинами  $d$ . Через конденсатор протягується повітря зі швидкістю  $v$  (м/с). На відхиляючий електрод подається напруга  $U$  (В). Слід зважити на таку характеристику іона – як рухливість. Якщо взяти сферичний іон у вакуумі і помістити його в електричне поле, то він почне рухатись з прискоренням і теоретично до швидкості світла. Але атмосфера Землі і наявність у ній інших частинок з якими зіштовхується іон призводить до прискорення рівним, або майже рівним нулю і сталої швидкості. Саме ця швидкість, котру набуває іон в одиничному електричному полі і є рухливістю іона.

За рухливістю у  $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  іони діляться на три групи: легкі – більше 0,77, середні – від 0,77 до  $1,21 \cdot 10^{-2}$ , важкі – від  $1,21 \cdot 10^{-2}$  до  $0,97 \cdot 10^{-4}$ . Виходячи з цих умов маємо формулу:

$$\lambda_+ = e \sum n_+ u_+ \quad (1)$$

$$\lambda_- = e \sum n_- u_- \quad (2)$$

де  $\lambda_-$ ,  $\lambda_+$  – провідність атмосфери,  $n$  – концентрація іонів та  $u$  їх рухливість.

Виходячи з цих умов, можна стверджувати, що основний вклад у провідність атмосфери дають легкі іони. Даним методом (аспіраційним конденсатором) вимірюють не концентрацію іонів, а струм, що створюється всіма іонами одночасно. Тому варто добрати методики по їх розділенню.

Відділити іони за рухливістю не є надто складною задачею. Вимірюючи спектр атмосферних іонів за рухливістю [3] виявили, що оскільки повітря в переважній більшості не надто забруднене, то піків у спектрі не так і багато. У результаті пристрій, який буде фіксувати лише іони конкретного діапазону рухливості, а також знаючи що заряд іону переважно дорівнює елементарному, можна зробити перерахунок сили струму в концентрацію. Спираючись на рис. 1, визначений на вимірювальному електроді струм задається інтенсивністю потоку іонів на цей електрод

$$I = e \frac{dn(u)}{dt} \quad (3)$$

де  $I$  – сила струму,  $e$  – елементарний заряд,  $n(u)$  – концентрація іонів з рухливістю  $u$ .

Звичайно, чим більша площа електроду тим більша сила струму. Габарити конденсатора і швидкість протягу повітря задають мінімальну вимірювальну рухливість  $u$ . Формула:

$$u \geq u_{\min} = \frac{d^2 v}{|U|l} \quad (4)$$

де  $u$  – рухливість на яку пристрій буде гарантовано реагувати,  $u_{\min}$  – мінімальна рухливість,  $d$  – відстань між електродами конденсатора,  $U$  – відхиляючий потенціал,  $v$  – швидкість протягу повітря.

Таким чином пристрій дає інформацію про всі іони, рухливість яких більша за  $u_{\min}$ . Звичайно іони з швидкістю меншою  $u_{\min}$  також будуть вносити свій вклад у результуючий струм, але чим менша їх рухливість тим менший шум створюваний ними. Це перша похибка, яку складно усунути.



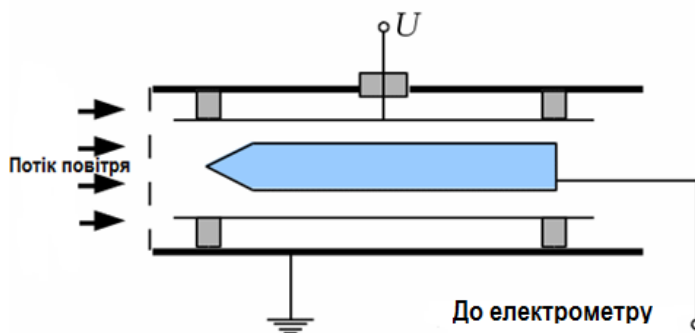


Рис. 2. Циліндричний конденсатор

Знаючи діапазон рухливості та силу струму створювану іонами в полі конденсатора, можна розрахувати еквівалентну концентрацію іонів. При розрахунку, як правило вважається, що кожен заряд іона (навіть важкого) дорівнює одному елементарному заряду. Але як відомо, що зустрічаються, хоча і рідко, факти подвійної іонізації, що дає нам другу похибку. Оскільки даний аспіраційний конденсатор буде вимірювати не тільки важкі іони, а всі що більше  $u_{\min}$ , то є декілька технічних рішень для обрахунку розподілу іонів різної рухливості.

**Технічні рішення побудови приладу для вимірювання розподілу іонізованих частинок.**

**Перший спосіб: послідовний.** В одній трубі (рис. 3) розміщують декілька конденсаторів послідовно. Конденсатори мають різні розміри і на них подаються різні напруги (для захоплення відповідних іонів). Через трубу протягують повітря, а з вимірювальних електродів конденсаторів знімають струм.

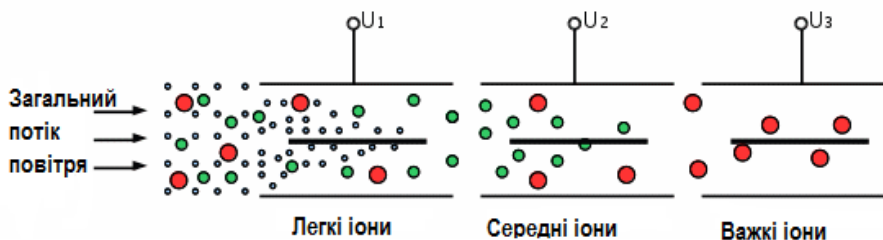


Рис. 3. Послідовний аспіраційний конденсатор

Переваги: кожен вимірний струм пропорційний тій чи іншій концентрації іонів. Недоліки: багато шумів, тому що кожен конденсатор дає наводку на наступний (конденсатор для легких іонів, при деякому збігу обставин, буде фіксувати частину середніх і важких іонів).

**Другий спосіб: паралельний.** У даному випадку (рис. 4) декілька конденсаторів отримують повітря з одного отвору, але вони різні і налаштовані на різні рухливості.

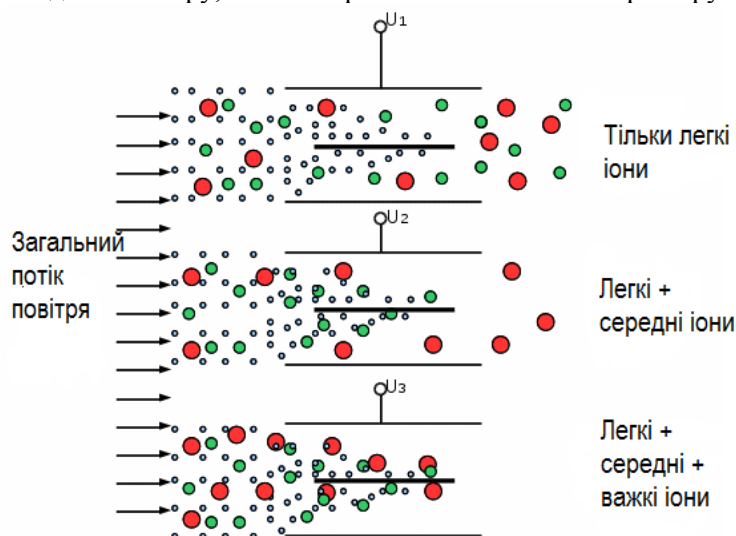


Рис. 4. Паралельний аспіраційний конденсатор

Переваги: немає наводок від попереднього конденсатора, а недоліки: потрібно застосовувати математичні розрахунки, оскільки конденсатор для легких іонів помірєє тільки легкі, конденсатор для середніх іонів помірєє середні і легкі, а конденсатор для важких – помірєє всі. Але це проста математична задача, де шляхом віднімання струмів, що зчитуються з конденсаторів, просто отримати об'єктивні результати. Даний метод є найбільш поширеним.

**Третій спосіб: змінної напруги.** У даному способі (рис. 5) потік повітря пропускають через один конденсатор змінюючи напругу на відхиляючому електроді.

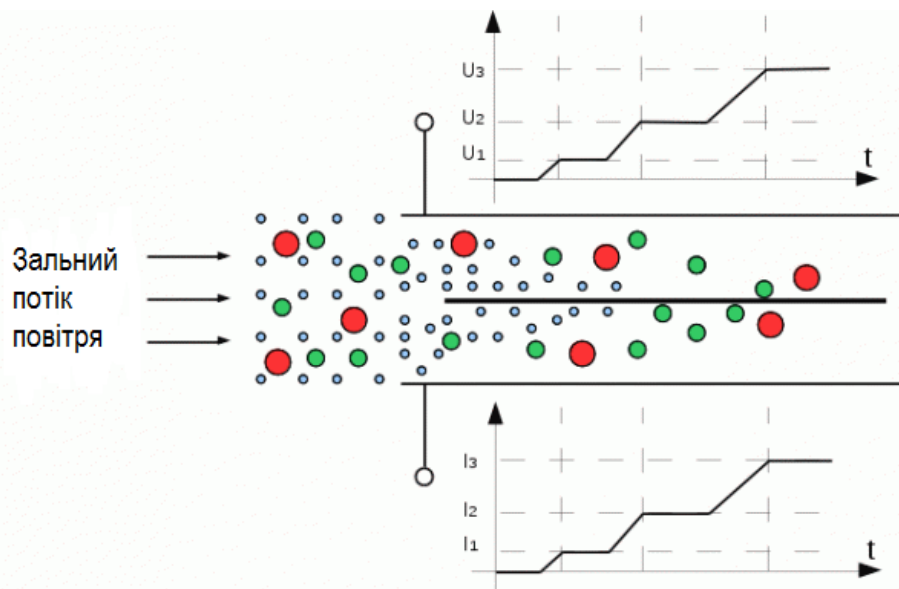


Рис. 5. Аспіраційний конденсатор змінної напруги

Переваги: малі розміри, а недоліки: ті ж самі що і при паралельному способі, а також технічна складність реалізації, так як для відхилення легких іонів інколи достатньо 10 ÷ 20 В, а для важких на тому ж конденсаторі потрібно до декількох кіловольт. Крім того, ще потрібно відмежувати ефекти перехідних процесів.

Тому перший і третій способи цікаві для експериментальних та наукових цілей, а другий для практичних вимірювань.

**Проблемні питання та можливі шляхи їх усунення.** При створення приладу з вимірювання потоку іонів ідеальним було б створення сферичного пристрою в умовах вакууму. При побудові в звичайних умовах виявляються проблеми, котрі значно впливають на якісні показники:

**Проблема № 1. Потік повітря.** Повітря достатньо складне середовище в розрізі руху і як будь яка в'язка система має властивість формувати турбулентні внутрішні вихрові потоки. Ця властивість вносить суттєву похибку: на вимірювальний включений конденсатор вихрові потоки повітря подадуть як негативні так і позитивно зарядженні іони і результат кількості від'ємних частинок буде від'ємним. Тобто кількість від'ємна, що буде свідчити про перевагу протилежно заряджених іонів. А заміри нікчемними. Тому форма, поверхня, геометричні розміри конденсатора повинні бути такими, щоб потік повітря всередині був ламінарним, тобто без будь яких завихрень.

**Проблема № 2. Ізоляція.** Це лише технічне питання. Оскільки струми, що знімаються з вимірювального електроду можуть бути в діапазонах нано- і пікоампер, то струми втрат мають мати ще нижчі показники. Звичайно для побутових приладів можна використати прокладки із фторопласта чи аналогічних матеріалів. Проте для цілей експериментальної геофізики таких допусків замало. Якщо наприклад поставити задачу виміряти концентрацію легких іонів від 1 іона/см<sup>3</sup> не в лабораторних умовах, а у відкритому середовищі природи, то ця задача буде ускладнена низкою природних додаткових факторів, таких як роса, комахи, пилюка, пилок рослин та ін. Все це зумовить швидке забруднення ізоляторів, що призведе до збільшення величини струму витоку.

Для уникнення природних факторів впливу слід забезпечити такі умови:

- від опадів прилад закрити захисним кожухом виводячи назовні лише втягуюче сопло та вихідний отвір втягуючого вентилятора;

- від роси варто забезпечити внутрішній підігрів ізоляторів та електричної частини;
- для зменшення струму витoku обладнання варто розмістити на діелектричному підвісі;
- щоб уникнути завихрень вітру та зміни швидкості руху повітря всередині аспіраційного конденсатора, прилад варто розмістити соплом забору вниз;
- окремою складністю є усунення похибок від пилу та комах, оскільки заземлена чи ні сітка збирає заряд на своїй поверхні і повністю невілює точність замірів; у таких умовах можливо забезпечити якість експерименту лише періодичною механічною чисткою приладу; при промиванні забруднених поверхонь слід також зважити антисептик, який для цього використовується, так як було помічено, що запах етилового спирту дуже приваблює деякі види комах. Для даної цілі варто використовувати ацетон;
- знизити вплив токів витoku можна наступним чином: подати на відхиляючий електрод високу напругу. У лабораторних умовах достатньо подати 300 В на відхиляючий електрод, а підсилювач встановити з вхідною напругою +/- 15 В. Проте для умов замірів на природі будь-яка комаха чи павутина з росою спричинить коротке замикання, що призведе до виходу із строю приладу.

**Проблема № 3. Динамічні характеристики.** Оскільки в аспіраційну камеру пристрою повітря заповнюється не миттєво, а поступово, наприклад за 10 с, то пристрій фіксуватиме вірні показники тільки у випадку, коли зміна фону іонізації буде не швидше 10 с. Пришвидшити період заміни повітря в аспіраційній камері можна шляхом збільшення швидкості втягування та при цьому виникає проблема з турбулентністю. Тому при розрахунку приладу слід враховувати середовище в якому проводитимуться заміри в аспекті теоретичної оцінки швидкості зміни іонізації.

#### **Висновки.**

1. Аспіраційний конденсатор дає інформацію про всі іони, рухливість яких більша за мінімальну рухливість  $u_{\min}$ . Іони з швидкістю меншою  $u_{\min}$  також вносять свій вклад у результуючий струм, що створює одну з основних похибок, яку складно усунути.

2. При розрахунку, як правило вважається, що кожен заряд іона (навіть важкого) дорівнює одному елементарному заряду. Подвійна іонізація створює додаткову похибку результатів вимірів.

3. Запропоновано три способи (послідовний, паралельний, змінної напруги) технічного рішення побудови приладу реєстрації розподілу іонізованих частинок методом аспіраційного конденсатора для коректної оцінки результатів вимірів. Перший і третій способи цікаві для експериментальних та наукових цілей, а другий для практичних вимірювань.

4. При створення приладу з вимірювання потоку іонів ідеальним було б створення сферичного пристрою в умовах вакууму. При побудові в звичайних умовах виявляються проблеми, котрі значно впливають на якісні показники.

#### **Інформаційні джерела**

1. Чижевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. Москва : Стройиздат, 1989. 488 с.
2. Посудін Ю. І. Фізика. : підручник. Біла Церква : Білоцерк. нац. агр. ун-т, 2008. 463 с.
3. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб : Гидрометеоиздат, 1992. 312 с.
4. Смирнов В.В. Природа и эволюция сверхмалых аэрозольных частиц в атмосфере. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 6. С. 723–748.
5. Сальм Я.Й. Ионы в приземном слое атмосферы. Химия плазмы. 1993. Вып. 17. С. 194–217.
6. Смирнов В.В. Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярноионизированном воздухе. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 321–331.

**Шипелик Ю.П., Федосов С.А., д.ф.-м.н.**

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

#### **МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ И ИХ ПРОБЛЕМАТИКА**

*В работе описываются особенности измерения концентрации заряженных частиц в воздухе (ионов). Рассматривается использование аспирационного конденсатора в качестве модельного датчика для измерения распределения ионизированных частиц. Предложено*

*технические решения построения прибора и пути корректного расчета результатов распределения ионов различной подвижности, установлено преимущества и недостатки. Работа преследует цель решения учеными проблемных вопросов по измерению потока ионов и возможные пути их устранения.*

**Ключевые слова:** ионизация, ионы, аспирационный конденсатор, отклоняющий электрод, измерительный электрод, аспирационная камера.

**Shypelik Yu.P., Fedosov S.A., Dr. Phys. & Math. Sc.**

Lesya Ukrainka Eastern European National University

#### **METHODS AND TECHNIQUES OF MEASUREMENT OF IONIZATION AND THEIR PROBLEMS**

*The paper describes the features of measuring the concentration of charged particles in the air (ions). The use of an aspiration capacitor as a model sensor for measuring the distribution of ionized particles is considered. The technical solutions for constructing the device and the ways of correct calculation of the results of distribution of ions of different mobility are proposed, advantages and disadvantages are established. The work is aimed at solving problems of ion flow measurement by scientists and possible ways of their elimination.*

**Keywords:** ionization, ions, aspiration capacitor, deflecting electrode, measuring electrode, aspiration chamber.

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!**  
**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО**  
**ЗБІРНИКА «ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»**

1. Наукова стаття повинна мати наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською, російською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об'ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1 см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською, російською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: звичайний 12 пт., крупний індекс 7 пт., дрібний індекс 5 пт., крупний символ 18 пт., дрібний символ 12 пт.). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рис. 1. Схема ...) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов'язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім'я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Наукові інтереси;
- Адреса для листування, телефон.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

### Основні наукові напрями:

1. Прилади та системи фізичних та біомедичних технологій.
2. Прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні.
3. Проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки.
4. Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація.
5. Проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com), в письмовому вигляді – за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. Приладобудування (каб. 40)**, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

### *Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:*

- перевірка статті на відповідність вимогам;
- прийняття рішення щодо прийому статті;
- інформування авторів про можливість публікації та дозвіл на оплату.

Статті приймаються українською, російською або англійською мовами. Вартість публікації становить **35 грн.** за 1 стор.

Оплата проводиться за реквізитами:

Картка Приватбанку № 5168 7573 4753 6411

В призначенні платежу слід вказати «**За видання статті у збірнику «Перспективні технології та прилади» від (ПБ)**».

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com).

Сайт видання <http://www.ptp.pp.ua>

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Журнал включено до переліку міжнародних наукових видань за номером ISSN 2313-5352

Видання індексується **Google Scholar**

Видання в національній бібліотеці **імені В.І. Вернадського**

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у технічного секретаря – **Марчук Ірини Вікторівни** за тел. **(0332) 26-49-43, 095-862-18-12**, або за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com).



## НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Комп'ютерний набір: Марчук І.В.  
Технічний редактор: Марчук І.В..  
Відповідальний за випуск Марчук В.І.  
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 26.06.2019 р.  
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.  
Ум. друк арк. 12,5. Обл.-вид. арк.12 Тираж 500 пр. Зам. № 59

Віддруковано у інформаційно-видавничому відділі  
Луцького національного технічного університету  
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Свідоцтво Держкомтелерадіо ДК №4123 від 28.07.2011 р.