

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Луцький національний технічний університет

**ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ**

**DOI:** <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15>

Збірник наукових праць

Випуск 15  
(грудень, 2019)

Луцьк 2019

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 5 від 26 грудня 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 грудень 2019р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019.-135 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

## 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»  
*Ларишин 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  
*Пилитець 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)  
*Мірослав 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 Szczepanek*, 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  
*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  
*Гайдук Мікулас*, д.т.н., професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина)  
*Середюк Орест Євгенович*, д.т.н., професор, Іванофранківський національний технічний університет нафти і газу  
*Марчук Ірина Вікторівна*, к.т.н., доцент, Луцький НТУ (відповідальний секретар)

| <b>ЗМІСТ</b>  |     |
|---|-----|
| Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н., Самойленко О.В., к. т. н.<br>Реінжиніринг – як шлях технічного оновлення підприємств  | 6   |
| Вісин О.О., к.і.н., доцент ,Федорчук-Мороз В.І. , к.т.н., доцент<br>Основні аспекти домедичної допомоги   | 13  |
| Григор'єва Н.С, д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н., доц.<br>Модульна технологія в приладобудуванні  | 21  |
| Даниленко О.В., к.т.н., Верба І.І., к.т.н., Самойленко О.В., к.т.н.<br>Діагностичний моніторинг обладнання як передумова забезпечення його<br>працеспроможності   | 26  |
| Денисюк В.Ю., к.т.н., Симонюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Карманський М.В.,<br>Ніщот Р.В.<br>Моделювання процесу взаємодії деталі і гранул при ударному навантаженні<br>вібробункера                                 | 33  |
| Захаров І.П., д.т.н., Чуніхіна Т.В., к.т.н., Папченко В.Ю., к.т.н.<br>Оцінювання невизначеності вимірювань при дослідженнях насіння соняшника нової<br>лінії  | 45  |
| Ліннік А.Ю. к.т.н., Диня В.І. к.т.н., Фльонц О.В. к.т.н., Дубчак Н.А. к.т.н..<br>Аналіз конструкцій очисників гички цукрових буряків  | 51  |
| V. Marchuk, D.Sc., T. Dzhuguryan, D.Sc., I. Marchuk, Ph.D, L. Sachkovska<br>The effect of temperature on the grinding surface quality ring roller   | 58  |
| Подригало М.А., Вербицький В.І., Коробко А.І., Байдала В.Ю.<br>Оцінювання адекватності результатів досліджень, що отримані різними методами<br>(в порядку обговорення)  | 63  |
| Полянский В. И., к. т. н.<br>Концепции высокоточной механической обработки отверстий в деталях машин  | 68  |
| Сергеев А. С., Новиков Ф. В., д.т.н., Шкурупий В. Г., к.т.н.<br>Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке  | 75  |
| О. Середюк, д.т.н., Н. Малісевич, аспірантка<br>Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-<br>контролю теплоти згорання природного газу  | 81  |
| Солтисюк В.І., Семенів І.І., Яциків М.М.<br>Конструктивно-технологічні методи забезпечення надійності малогабаритної<br>сільськогосподарської техніки   | 90  |
| Стасюк В.М., к.т.н.<br>Динаміка підкритичного режиму пневмомеханічних приводів машин ударної дії  | 94  |
| Yu.S. Kholodnyak, Ph.D., A.A. Kostikov, Ph.D., S.V. Podlesny, Ph.D., S.V. Kaporovych,<br>Ph.D.<br>About computer programs for simplified methodology of complex assessment of strength of<br>two-beam beams                   | 99  |
| Yu. S. Kholodnyak, Ph.D., S.V. Podlesny, Ph.D., S.V. Kaporovych, Ph.D., Ye. D. Korotenko,<br>Ph.D.<br>On application of a simplified two-dimensional model of forced oscillations to the power<br>analysis of flat steelworks | 109 |
| I. Yakovenko, V. Martynenko, M. Turchyna<br>Biometrical identification on the basis of photoplethysmogram for automated medical systems   | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>I. Yakovenko, A. Rudoy, M. Turchyna</b><br><b>Improvement of the credibility of analysis of electrocardiograms for biometric personal identification</b>                | 125 |
| <b>Ящинський Л.В., Захарчук Д.А., Коваль Ю.В., Панасюк Л.І.</b><br><b>Діагностика якості гартування кілець підшипників з використанням явища електромагнітної індукції</b> | 131 |

УДК 621.9

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-1>

Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н., Самойленко О.В., к. т. н.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

**РЕІНЖИНІРИНГ – ЯК ШЛЯХ ТЕХНІЧНОГО ОНОВЛЕННЯ ПІДПРИЄМСТВ**

**Анотація.** *Стаття присвячена проблемам наукоємного машинобудування. Для України нагальним є відновлення машинобудування і імпортозаміщення. Але впровадження новітніх технологій у виробництво старої формації недоцільне. Традиційні принципи організації виробництва, які орієнтовані на масове виробництво типової продукції, не є ефективними в умовах, коли ринок контролюється споживачами. Інноваційні підходи вимагають принципово нового типу виробництва – гнучкого, яке базою має інформаційні технології.*

*Основними інструментами створення підприємств відповідного рівня є інжиніринг та (навіть в більшій мірі) реінжиніринг. Інжиніринг вирішує питання підготовки і організації виробництва, керування підприємством, забезпечення реалізації продукції, а Реінжиніринг, натомість, є фундаментальним перепроєктуванням всіх ділових процесів (реінжиніринг бізнесу), а технологічний реінжиніринг, відповідно, стосується реструктуризації виробництва і всіх процесів, які його супроводжують, з метою досягнення стрибкоподібного поліпшення головних показників діяльності компанії: вартість, якість, сервіс, темпи. Передбачено розробку низки проектів, зокрема автоматизації виробництва, і об'єктивне планування технічного переозброєння підприємства, яке є проблемою. Названі шляхи та стадії, які супроводжують це планування, і підкреслено роль інформаційних технологій.*

**Ключові слова:** *інноваційне машинобудування, імпортозаміщення, інжиніринг, реінжиніринг, конкурентоздатність верстатобудування, автоматизація виробництва, кластери.*

**Вступ.** Сучасне наукоємне машинобудування характеризується певною (не традиційною) структурою та інфраструктурою, управлінням, використанням інформаційних та оброблювальних технологій, утворенням кластерів, взаємозв'язком із світовим машинобудуванням і транснаціональними корпораціями, вимагає високої концентрації інтелектуальних ресурсів, нових знань, системних рішень, інформаційних технологій. Принциповим є питання, чи можна сподіватися на суттєві зміни внаслідок впровадження новітніх технологій у існуючий тип виробництва старої формації, а чи, навпаки, інноваційні підходи можуть виявитися несумісними з ним і вимагають принципово нового типу виробництва, що пов'язано із певними ризиками.

**Постановка проблеми.** Що відбувається з нашими машинобудівними підприємствами? І з тими, які ще збереглися попри все, і з тими новими, які виникли, але найчастіше на тих самих традиційних організаційних засадах? Як завжди, сакраментальні питання: «Хто винен?» і «Що робити?». І від того, що вони стосуються не соціальної сфери, не політики, а таких прагматичних питань, як верстатний парк, технологічні процеси тощо, тобто проблем, що не належать до суто експертних і піддаються обчисленню, ні легше, ні зрозуміліше не стає і відповіді як не було, так і немає.

Ми не ставимо під сумнів потребу зберегти машинобудування в Україні, зокрема бажання поновити й розвинути верстатобудівні підприємства, які є серцем машинобудування і суттєво впливають на рівень розвитку економіки: Радянська Україна була двадцятою за масштабами економікою світу, її промисловість виробляла 2 % світового ВВП, за багатьма видами продукції вона була монополістом у Радянському Союзі. Прикро чути навіть від «технарів», професійна діяльність яких пов'язана із машинобудуванням: «А навіщо нам взагалі верстатобудування? Як треба, купимо верстат». Не буду казати, що знищення верстатобудування – це втрата робочих місць у галузі, в якій Україна ніколи не пасла задніх. А що і скільки ви збираєтесь купувати? Відзначте, ми не питаємо, за які кошти. Але як на ділі ви визначите, що вам потрібно і як саме буде забезпечено завантаженість обладнання на належному рівні? Це питання, до речі, стосується взагалі придбання нового обладнання будь-якої вартості і в будь-якого постачальника.

Проблема заміщення імпорту наразі стоїть гостро не тільки для верстатобудування, а й для машинобудування взагалі, тобто і для промисловості в цілому. Переведення на інноваційний шлях розвитку вимагає докорінного оновлення активної частини основних

фондів, а для цього обов'язковою умовою є відновлення й розширення наявних та створення нових вітчизняних конкурентоздатних виробництв, які зможуть поставляти обладнання необхідної якості й такого, що відповідає вимогам інноваційного підприємства

**Аналіз досліджень та рекомендацій.** У західноєвропейській економіці машинобудування посідає 1-е місце серед інших галузей промисловості за кількістю зайнятих і за вартістю продукції (до 40 % вартості європейського промислового продукту). Саме машинобудування використовує високі технології і приносить їх в інші галузі у вигляді сучасних машин, обладнання, технологій і тим визначає рівень розвитку економіки. На промисловість України припадає 1/3 основних фондів, і більш за 35 % населення.

Більшість продукції машинобудування належить до такої, яка може і повинна отримувати інвестиції, певна частина її є проміжними виробами, що надходять у інші галузі, де виробляється інноваційна продукція машинобудування. Наприклад, структура машинобудівного комплексу країн Західної Європи охоплює 20 великих галузей та більш за 100 спеціалізованих підгалузей і виробництв.

Одним з напрямків розвитку сучасного машинобудування є роботизація: сучасні гнучкі виробничі системи є інтеграцією комп'ютеризованих обробних центрів і промислових роботів. Близько 75 % світового парку промислових роботів зосереджено у машинобудуванні [3].

Українське верстатобудування втратило свої позиції серед виробників верстатного обладнання: наш ринок залежить від іноземних постачальників (імпортна залежність до 98% [1]), перше місце серед яких посідає Німеччина і повсякчас з'являються нові компанії, які співробітничать із українськими промисловцями). Частка обладнання, яке експортується з України, невпинно зменшується: ще у 2013 р. вона складала біля 40 % і при тому 25,5 % припадало на Росію (незалежно від стану верстатобудування цієї статті експорту вже немає).

Міжнародний розподіл праці досяг такого рівня, коли немає країни, життя якої було б ізольовано від зовнішнього світу і обмежувалось лише власною державою. Діяльність транснаціональних корпорацій постійно поширюється: вони охоплюють понад 40 % загального об'єму виробництва розвинених країн. «Міжнародне виробництво» – один з показників економіки. Транснаціональні корпорації дали можливість забезпечити виробництво продукції із деталей, які виробляються в різних країнах, завдяки інтеграції підприємств корпорації. Великі компанії на бажання замовника надають повну технологічну підтримку з вибору оптимального ріжучого інструменту, режимів різання, верстатного оснащення, програмного забезпечення, вже не кажемо про поставку запчастин та витратних матеріалів.

Глобалізація напряму зачепила Україну і її машинобудування, бо в Україні витрати на підготовку персоналу були незначні, а підприємства стали легкою здобиччю, бо з 1991 р. почався прогресуючий процес ліквідації промисловості. Зараз частка машинобудування в українській промисловості складає біля 15 %, у ВВП – біля 12 %. Моральне та фізичне зношення парку верстатів становить 75-80 %. Енерговитрати на одиницю промислової продукції в 6-8 разів перевищують аналогічний показник для розвинених країн, в яких частка машинобудівного виробництва становить від 30 до 50 % загального об'єму промислової продукції. До того ж в Україні фактично ліквідована система підготовки й перепідготовки робітничих кадрів [3].

**Викладення основного матеріалу.** Вважається [3], що технологічна база промислового комплексу повинна мати три складові: верстатобудування, електроніка та приладобудування. Ці галузі повинні розвиватися з випередженням, бо забезпечують саме існування і розвиток всієї промисловості, натомість підприємства цих галузей мають застарілу технологічну базу, а продукція електроніки й приладобудування неконкурентоздатна і ненадійна. Модернізація і оновлення здійснюються за рахунок імпортного обладнання і наша промисловість опиняється в залежності від закордонних виробників. Перелік техніки, яка імпортується, показує, що значна її частина могла б вироблятися на вітчизняних підприємствах. Високі ціни на імпортну техніку зумовлюють збільшення ціни продукції, яка, виробляється з її участю (наприклад, високі ціни на імпортну сільськогосподарську техніку, доля якої складає біля 80 % у загальному об'ємі, зумовляють високі ціни вітчизняної сільськогосподарської продукції і стримують розвиток сільського господарства).

Імпортозаміщення в Україні стримується низкою обставин, однією з основних є зупинка й фактичне знищення багатьох підприємств, перепрофілювання для виробництва зовсім «далекої» продукції, а також низька конкурентоздатність вітчизняного верстатобудування, яка зумовлена наступним:

- низька надійність і довговічність верстатів;
- незадовільна якість;
- низький рівень використання науково-технічних досягнень і сучасних технологій;
- обмежений законодавчо (Євросоюз, США [3]) доступ на український ринок для певних іноземних технологій і обладнання, зокрема технологій подвійного призначення, які можуть застосовуватись для цивільного і військового виробництва (до них належить все обладнання для виробництва літальних апаратів, суден та іншої стратегічної продукції – п'ятикоординатні обробні центри, прецизійні верстати, верстати для об'ємного лазерного різання тощо). Вказана обставина обмежує і продуктивність, і якість, і гнучкість обладнання українських підприємств та, відповідно, їхньої продукції.

- відсутність виробничих і складських мереж, що сприяють швидкій реалізації проектів на замовлення;

- неузгодженість вітчизняних і закордонних стандартів стримує розвиток інжинірингу, зокрема надання цих послуг іноземними компаніями;

- недосконала українська фінансово-банківська система (іноземні фірми мають можливість надавати послуги в кредит під невисокі відсотки чи в розстрочку, що важливо для українських замовників, українські виробники часто працюють на умовах субпідряду з іноземними компаніями), відсутність фінансової підтримки з боку держави експортерів продукції машинобудування;

- недосконала підготовка спеціалістів в області інжинірингу.

У 20-му ст. для верстатобудування, як і взагалі для машинобудування, була характерна концентрація на одному підприємстві виробництва всіх компонентів, за винятком типових комплектуючих (електродвигуни, підшипники тощо), що в принципі забезпечувало незалежність підприємства. Таким чином виробництво здійснювалось винятково чи переважно на національній основі. Велика серійність продукції виключала будь-які зміни у конструкціях, які були б бажані замовнику. Навіть агрегатні верстати були підпорядковані жорстким рамкам у своїх можливостях адаптації до виготовлення іншої деталі, та ще й вимагали значного часу.

Застосовувати традиційні принципи організації виробництва, які орієнтовані на масове виробництво типової продукції і передбачають поділ виробничого процесу на елементарні завдання, що не потребують складного обладнання й високої кваліфікації робітників (тобто ті принципи, що їх свого часу запропонував ще Адам Сміт – багатоступеневий поділ праці й координація усіх етапів) у сучасному світі не є ефективним. Ринок контролюється споживачами, які вільні у виборі і хочуть у зручній для себе час і у зручному місці отримувати адаптовану до їхніх потреб продукцію. Завдяки інтеграції виробництв у структури транснаціональних корпорацій виробництво може здійснюватися таким чином, щоб остаточний випуск продукції міг здійснюватися у різних країнах з деталей, які, в свою чергу, виробляються будь-де. Звісно, вибір місця, де здійснюється виробництво, не є довільним, визначається найчастіше пошуком дешевої робочої сили. Тобто змін потребують не лише обладнання й технології, а, чи не в першу чергу, моделі керування й промислової організації. Глобалізація виробництва вимагає доступу до інформаційно-комп'ютерних технологій, що, в свою чергу, робить доступнішими ринки, зокрема і в традиційних секторах промисловості.

Якщо казати про сучасні верстати, то основною вимогою до їхніх показників працездатності, яка превалює навіть над вимогою продуктивності, є гнучкість. Це вимога споживача, яка, в свою чергу, визначає конструктивну реалізацію верстату, зокрема здатність до реконфігурації (так звана «відкрита архітектура»). Тобто поява «адресної» розробки обладнання під конкретні вимоги була явно на часі. Гнучкому виробництву притаманні як здатність швидко змінювати технологічні процеси чи конфігурацію деталей, так і здатність регулювати об'єми випуску – зменшувати або збільшувати серійність виробництва без зниження рівня ефективності. Гнучкі форми виробництва базуються на гнучких технологіях, гнучких відносинах центральних фірм та постачальників, гнучкій організації виробничого процесу [3]. І, звісно, для багатьох видів обладнання й технологій обов'язковою базою знову таки стають інформаційні технології.

За звичай в якості шляхів, що можуть зарадити в ситуації необхідності осучаснення верстатобудування (як однієї з основних складових галузі машинобудування), називають створення спільних з провідними світовими компаніями верстатобудівних підприємств, відновлення й технічне переозброєння власних верстатобудівних підприємств, створення і розвиток малих та середніх підприємств, орієнтованих на виробництво малогабаритного



обладнання різного призначення (спеціалізоване точне малогабаритне обладнання може скласти конкуренцію середнім верстатам з ЧПК) і мехатронних вузлів (що є порівняно новим проектом на наших теренах, який обіцяє рентабельність і значне зниження вартості виробництва).

А з точки зору оновлення (технічного переозброєння) конкретного верстатного парку будь-якого підприємства чи галузі теж є певні напрямки дій [1, 2]:

– повна заміна верстатного парку – шлях дуже вартісний, вимагає обґрунтування економічної доцільності по кожній одиниці обладнання навіть у разі створення нового підприємства;

– використання потрібного обладнання, придбаного на вторинному ринку (тобто модернізованого й оновленого) або власного відремонтованого;

– повна орієнтація на власне обладнання, відремонтоване й модернізоване, бажано на спеціалізованому підприємстві чи із залученням його фахівців;

– капітальний ремонт обладнання власними силами – найгірший варіант.

Основними інструментами створення підприємств відповідного рівня у сучасних умовах є інжиніринг та (можливо, навіть в значніший мірі) реінжиніринг і кожен з них вирішує притаманні саме йому задачі.

Інжиніринг має за об'єкти технологічні системи, закони їхнього створення й розвитку і передбачає змінювання з метою поліпшення та впровадження у життя технічних, організаційних, фінансово-економічних моделей та об'єктів, тобто це сукупність дій, пов'язаних із підготовкою і організацією виробництва, керуванням підприємством, забезпеченням реалізації продукції. Реінжиніринг, натомість, є фундаментальним перепроєктуванням всіх ділових процесів (реінжиніринг бізнесу), а технологічний реінжиніринг, відповідно, стосується реструктуризації виробництва і всіх процесів, які супроводжують виробництво, з метою досягнення різкого, стрибкоподібного поліпшення головних показників діяльності компанії: вартість, якість, сервіс, темпи. Реінжиніринг є доцільним, коли компанія знаходиться на грані краху через низьку конкурентоздатність продукції або передбачає проблеми найближчим часом, наприклад, через появу на ринку нових конкурентів чи привабливішої для користувача продукції, або, як мінімум, бажає зберігати провідні позиції на ринку. Тож реінжиніринг застосовують, коли треба збільшити показники діяльності компанії не на 10 % і навіть не на 100 % (для цього використовують традиційні методи – наприклад, програми підвищення якості тощо), а маючи на меті стрибок показників діяльності на 500–1000 %. Але треба розуміти, що ступінь ризику при цьому досить значна. Основним засобом замість стратегічного управління є інформаційні технології.

Тобто в будь-якому випадку це розробка низки проектів [4], яка може здійснюватися власним персоналом або місцевими фірмами з консультаціями іноземної інжинірингової компанії або повністю здійснюється іноземною компанією з відповідальністю за результат. В принципі можливим є будівництво нового об'єкту «під ключ», але це не є типовою ситуацією для машинобудування взагалі й верстатобудування зокрема. Об'єктом нашого зацікавлення є не просто модернізація виробництва, а створення сучасного автоматизованого виробництва з широким використанням інновацій та інформаційних технологій.

Реалізація технічної сторони автоматизації принципово ясна: роботизація технологічних процесів, мехатронізація обробних комплексів, комп'ютеризація керування й контролю засобів виробництва та допоміжних систем оснащення на всіх його стадіях, технічна підготовка виробництва й керування бізнес-процесами на основі IT-технологій.

Підприємства купують вартісне закордонне обладнання, але воно використовується неефективно чи не за цільовим призначенням, тобто даремно витрачають неабиякі гроші: обладнання, навіть найсучасніше, постачають дистриб'ютори, які можуть виконати лише окремі проектні розробки й розрахунки, але не розробити концепцію підприємства. Створюють технопарки, які практично не функціонують чи в кращому разі не так, як планувалося. Тобто цілком зрозуміло, що модернізація підприємств повинна бути плановою, системною, інноваційною і, безперечно, з обов'язковим впровадженням інноваційних пропозицій з конкретних напрямків і конструкцій.

Отже однією з проблем створення автоматизованого виробництва є об'єктивне планування технічного переозброєння підприємства з оновленням верстатного парку (під інвестиції різного статусу, найчастіше державні і приватні ресурси). Для вирішення цієї проблеми застосовують наукоємні методики проведення технологічного аудиту, експертних оцінок, техніко-економічного

обґрунтування нововведень та стратегічного аналізу, перш за все – процесу виробництва та стану галузі та напрямків її розвитку. Витрати на цій стадії відносно невеликі, але ризики й ціна помилок високі, бо закладається майбутня структура виробництва на значний час, її конкурентоздатність і визначаються параметри інвестицій. На цій стадії інформаційні технології грають одну з головних ролей, бо лише такі засоби дозволяють отримати «прозорий» план технічного переозброєння підприємства, який підтверджено «портфелем замовлень», що є залежним від держзамовлень, ринкової кон'юнктури та прогнозів. Використовують, зокрема, імітаційне моделювання виробничих процесів підприємства. Слід враховувати, що план технічного переозброєння охоплює не лише суто виробничі процеси, а й інші види діяльності підприємства: постачання, логістику, маркетинг та реалізацію продукції, персонал, сервіс, фінанси тощо.

Щоб не отримати фрагментарний розв'язок і часткову модернізацію, спеціалісти, які здійснюють планування технічного переозброєння, повинні володіти спеціальними методиками сучасного реінжинірингу, але наявний дефіцит досвідчених інженерних кадрів, зокрема, експертів-технологів. Отже звертаються до послуг експертно-інжинірингових компаній, які вже з'явилися на ринку України. Іншою задачею, яку вже протягом десь десятиріччя без особливого успіху намагається розв'язати Україна, є намагання перейти на шлях кластеризації промисловості. Як відомо, з 31-ї європейської країни 26 мають національні кластерні програми. Алгоритм формування іноваційного промислового кластеру наведено, наприклад [3], є низка досліджень з вказаної тематики. Кластери можуть створюватися на базі існуючих промислових підприємств та об'єднань або в зовсім нових галузях. У будь-якому випадку в утворенні кластеру приймають участь наукові й освітні заклади, які інтенсифікують іноваційну складову. Всі досягнуті успіхи України в цьому напрямі є досить безсистемними, а іноді відверто формальними: нібито й створили, а результати відсутні. Однією з причин є недостатня кваліфікація персоналу, зокрема й наукового потенціалу, який повинен забезпечити нові розробки. Хоча слід зазначити, що в Україні з'явилися фірми, що поставляють спеціалізовані послуги щодо маркетингу, предиктивної аналітики, експертної оцінки виробництва, інжинірингу, тощо.

**Висновки.** Якщо лишити осторонь політично-економічні чинники ситуації, що створилася із верстатобудуванням, не акцентувати увагу на іноваційному рівні розробок (це зовсім інша розмова) та конструкційних особливостях обладнання, а зупинитися лише на вимогах, які визначають значні (революційні) зміни у організації виробництва, слід зазначити наступне.

Методи для управління ринковими відносинами й забезпечення безкризового розвитку, які пропонують в своїх дослідженнях закордонні вчені, придатні для сталих ринкових умов і застосувати їхні результати в умовах України неможливо.

До традиційних недоліків можна віднести

1. неготовність підприємств до модернізації, некваліфікований менеджмент, низька управлінська, технологічна, маркетингова грамотність, неефективне інформаційне забезпечення;
2. недосконала система впровадження у виробництво результатів наукових розробок;
3. невизначеність ринкової та економічної ситуації, яка зумовлює:
  - вимогу зростання швидкості прийняття рішень (охоплює обґрунтування й доведеність пропонуваніх рішень);
  - невизначеність майбутньої виробничої програми в умовах ринкової кон'юнктури й дрібносерійного виробництва, що не дозволяє обрати необхідне обладнання не за вартістю, а за показниками працездатності та завантаженості і при чималому обсязі пропозицій на ринку не така то й проста задача

Звісно, однією з перепон є недосконала фінансово-економічна політика держави, нестача коштів: новий верстат, може, і куплять, а от у маркетинг чи перепідготовку кадрів навряд чи вкладуть (в усякому разі не всі підприємці).

Умовою відновлення вітчизняної промисловості, зокрема й верстатобудування, є обов'язкове підґрунтя у вигляді державної промислової політики, яка забезпечить іноваційні перетворення, тож і інтеграцію української економіки у світову.

Але перш за все необхідно, щоб виробничники, особливо підприємства, які давно на ринку й пам'ятають кращі часи, коли їхня репутація серед споживачів немало важила, а кількість замовлень перевищувала можливий випуск, врешті решт прийшли до висновку про необхідність організувати виробництво геть по-іншому, на сучасних засадах і на основі ІТ-

технологій, як в управлінні, так і безпосередньо у виробництві. Такою ж нагальною потребою є відновлення підготовки кадрів для промисловості за інженерними спеціальностями, притому за запитом підприємств. Доки викладачі будуть вигадувати теми дипломних проєктів, дуже цікаві, але невідомо кому потрібні, окрім підтвердження компетенцій випускника, тобто його здатності виконувати певні роботи? Інноваційні розробки повинні мати адресата і не бути мистецтвом заради мистецтва.

#### Інформаційні джерела

1. Современные тенденции создания модульного оборудования и перспективы модернизации имеющегося станочного парка. / подг. А. Бельский, 2016 р. – URL:

<https://www.tecorp-group.com.ua/sovremennye-tendencii-sozdaniya-modulnogo-oborudovaniya-i-perspektivy-modernizacii-imeyushhegosya-stanochnogo-parka>

2. Verba I., Danylenko O., Yakhno A. Machine-building technical exclusion: trends, perspectives, ways // «Перспективні технології та прилади»: Збірник наукових праць, 2018, №12, – с.23-29 – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. –196 с.

3. Мехович С.А. Формирование региональных межотраслевых связей на основе концепции технологического реинжиниринга: монография / Мехович С.А., – Харьков: «Щедра садиба плюс». – 352 с.

4. Баранова И.В., Зайцев А.В. (2016). Реинжиниринг как инструмент модернизационной стратегии предприятия // Вопросы инновационной экономики, – 2016 – №6 (3) – doi: 10.18334/vinec.6.3.36967 [https://www.researchgate.net/publication/310590774\\_Reinziniring\\_kak\\_instrument\\_modernizacionnoj\\_strategii\\_predpriatia](https://www.researchgate.net/publication/310590774_Reinziniring_kak_instrument_modernizacionnoj_strategii_predpriatia)

**Верба І.І., Даниленко А.В., Самойленко А.В.**

#### **РЕИНЖИНИРИНГ - КАК ПУТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБНОВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Аннотация.** *Статья посвящена проблемам наукоемкого машиностроения. Для Украины насущным является восстановление машиностроения и импортозамещения. Однако внедрение новейших технологий в производство старой формации нецелесообразно. Традиционные принципы организации производства, ориентированные на массовое производство типовой продукции, не эффективны в условиях, когда рынок контролируется потребителями. Инновационные подходы требуют принципиально нового типа производства – гибкого, опирающегося на информационные технологии.*

*Основными инструментами создания предприятий соответствующего уровня является инжиниринг и (даже в большей степени) реинжиниринг. Инжиниринг решает вопросы подготовки и организации производства, управления производством, обеспечения реализации продукции, а реинжиниринг, вместо того, является фундаментальным перепроектированием всех деловых процессов (реинжиниринг бизнеса), а технологический реинжиниринг, соответственно, касается реструктуризации производства и всех процессов, которые его сопровождают, с целью достижения скачкообразного улучшения главных показателей деятельности компании: стоимость, качество, сервис, темпы. Предусмотрена разработка ряда проектов, в частности автоматизации производства, и объективное планирование технического перевооружения производства, являющегося проблемой. Названы пути и стадии, сопровождающие это планирование, и подчеркнута роль информационных технологий.*

**Ключевые слова:** *инновационное машиностроение, импортозамещение, инжиниринг, реинжиниринг, конкурентоспособность станкостроения, автоматизация производства, кластеры*

**Verba I., Danylenko O., Samoilenko O.**

#### **REENGINEERING - AS A WAY OF TECHNICAL MODERNIZATION OF ENTERPRISES**

**Summary.** *The article is devoted to the problems of high-tech engineering. It is crucial for Ukraine to restore mechanical engineering and import substitution. But the introduction of the latest technologies in the production of the old formation is inappropriate. Traditional principles of production organization, which are focused on mass production of typical products, are not effective in conditions where the market is controlled by consumers. Innovative approaches require a fundamentally new type of production – flexible, which is based on information technology.*

*The main tools for setting up businesses at the right level are engineering and (even more so) re-engineering. Engineering solves the issues of preparation and organization of production, enterprise management, production assurance, and Reengineering, in turn, is a fundamental redesign of all business processes (business reengineering), and technological re-engineering, respectively, refers to the restructuring of production and all the processes that accompany it, with the purpose of achievement of a jumping improvement of the main indicators of the company's activity: cost, quality, service, pace. A number of projects, including automation of production, and objective planning of the technical re-engineering of the enterprise, which is a problem, are envisaged. The paths and stages that accompany this planning are outlined and the role of information technology is emphasized.*

**Key words:** *innovative machine building, import substitution, engineering, reengineering, machine tool competitiveness, production automation, clusters.*

УДК 351.79

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-2>

Вісін О.О., к.і.н., доцент кафедри цивільної безпеки

Федорчук-Мороз В.І., к.т.н., доцент кафедри цивільної безпеки  
Луцький НТУ

### ОСНОВНІ АСПЕКТИ ДОМЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

У статті висвітлено основні аспекти домедичної допомоги. Наведена нормативно – правова база підґрунтя проведення навчання з домедичної допомоги. Висвітлено програми за якими проводиться навчання з домедичної допомоги постраждалому та наведено перелік навичок, якими повинні оволодіти слухачі після закінчення навчання.

В Україні середній показник смертності внаслідок надзвичайних ситуацій – 130-135 осіб на 100 тис. населення (за даними ДСНС), що в 3–5 разів перевищує показники країн Європи.

На догоспітальному етапі помирає 76% потерпілих, у лікарнях – 24%. У розвинених країнах світу на догоспітальному етапі помирає 28%, у лікарнях – 72%.

Так відбувається тому, що, зі 100 осіб, які померли на догоспітальному етапі, приблизно 20% отримали несумісні з життям травми, а смерть 80% потерпілих настала внаслідок неефективної евакуації до лікувальних закладів і неправильно організованої домедичної допомоги безпосередньо в зоні надзвичайної ситуації.

Якщо поруч із травмованим немає людини, яка за своїми службовими обов'язками повинна володіти основними практичними навичками з рятування та збереження життя, надавати допомогу мусить той, хто поблизу. Дії рятувника мають бути швидкими, продуманими, рішучими й доцільними. Потрібно вміти робити це правильно, адже головний принцип під час надання домедичної допомоги - не нашкодити. Хоча в надзвичайній ситуації зберігати спокій досить складно, допоможе в цьому чітке усвідомлення того, що робиш і з якою метою.

**Ключові слова:** домедична допомога, навчання, уміння, нормативно-правова база, аптечка.

**Проблема.** Сучасне виробництво пов'язане перш за все з високотехнологічним обладнанням, автоматизованими лініями та складним електронно-механічним начинням приладів. Але водночас це динамічна, рухома та сконцентрована робота багатьох людей, які керують, слідкують за роботою та ремонтують промислове обладнання. Цим людям потрібні безпечні умови праці та своєчасна домедична допомога у разі надзвичайної ситуації чи загострення хвороби.

За статистикою Всесвітньої організації охорони здоров'я, серцево-судинні захворювання є лідерами в рейтингу смертності населення в Україні та країнах Європи. Нерідко хвороби серця чи інсульт можуть викликати раптове погіршення стану людини та зупинку серця на очах у працівників підприємства. У цих випадках навички надання домедичної допомоги стають надважливими [1].

Першочерговим завданням для вирішення зазначеної проблеми є забезпечення якомога раннього початку надання домедичної допомоги постраждалим. Сучасною медичною наукою визначено концепцію так званої «золотої години», астрономічна година (60 хв.) з моменту отримання травми або ушкодження, протягом якого має бути надано максимальний обсяг медичної допомоги постраждалому з метою порятунку його життя та здоров'я [2].

Найголовніше, це необхідність забезпечення якнайшвидшого початку надання домедичної допомоги безпосередньо на місці аварії, нещасного випадку але дотримуючись всіх протоколів з надання домедичної допомоги потерпілому. Досвід найбільш розвинених країн світу свідчить про те, що для досягнення цього недостатньо сил і засобів державної системи охорони здоров'я. Для забезпечення своєчасності невідкладної домедичної допомоги в усіх цивілізованих країнах світу широкого застосування набула практика залучення до вирішення зазначеної проблеми окремих категорій немедичних працівників шляхом запровадження навчання навичкам надання домедичної допомоги [2].

Відповідно до ст. 18 Закону України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р. № 2694-ХІІ, працівники під час прийняття на роботу і в процесі роботи повинні проходити за рахунок роботодавця інструктаж, навчання з питань охорони праці, надання першої медичної допомоги

потерпілим від нещасних випадків і правил поведінки у разі виникнення аварії. Найчастіше ці інструктажі проводять самі фахівці з охорони праці.

Отже, до прибуття медичних працівників підприємства або фахівців екстреної медичної допомоги працівники мають надати постраждалому необхідну допомогу відповідно до 29 Порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 16 червня 2014 р. № 398.

Щодо формулювання термінів:

- домедична допомога - це невідкладні дії та організаційні заходи, спрямовані на врятування та збереження життя людини у невідкладному стані та мінімізацію наслідків впливу такого стану на її здоров'я, що здійснюються на місці події особами, які не мають медичної освіти, але за своїми службовими обов'язками повинні володіти основними практичними навичками з рятування та збереження життя людини, яка перебуває у невідкладному стані, та відповідно до закону зобов'язані здійснювати такі дії та заходи;

- екстрена медична допомога - це медична допомога, яка полягає у здійсненні працівниками системи екстреної медичної допомоги відповідно до Закону невідкладних організаційних, діагностичних та лікувальних заходів, спрямованих на врятування і збереження життя людини у невідкладному стані та мінімізацію наслідків впливу такого стану на її здоров'я;

- парамедик - немедичний працівник, який пройшов спеціальну підготовку з питань надання невідкладної допомоги за 120-годинною навчально-тренувальною програмою при спеціальному учбово-тренувальному центрі і раз на три роки проходить відповідну перепідготовку за 30-годинною програмою;

- рятувальник - немедичний працівник, який пройшов спеціальну підготовку з питань надання невідкладної допомоги за 48-годинною навчально-тренувальною програмою при спеціальному учбово-тренувальному центрі і раз на три роки проходить відповідну перепідготовку за 18-годинною програмою;

- санітарний інструктор - немедичний працівник, який пройшов спеціальну підготовку з питань надання невідкладної допомоги за 12-годинною навчально-тренувальною програмою при спеціальному учбово-тренувальному центрі і раз на три роки проходить відповідну перепідготовку за 6-годинною програмою.

Основна мета домедичної допомоги – усунення причин, що загрожують життю постраждалого на момент травмування, та попередження розвитку важких ускладнень. Оптимальний термін надання першої медичної допомоги – до 30 хв. після отримання травми. При зупинці дихання цей термін скорочується до 5-10 хв.

Обсяг домедичної допомоги включає:

- діставання постраждалих із-під завалів, винос (вивіз) з осередку ураження;
- тимчасова зупинка зовнішньої кровотечі шляхом: накладання джгута для зупинки крові (стандартного або імпровізованого), пов'язки, та пальцьове стиснення магістральних судин;
- усунення асфіксії шляхом вивільнення верхніх дихальних шляхів від слизу, крові, ґрунту і можливих сторонніх тіл, надання визначеного положення тілу (при западанні язика, блювоті, сильній носовій кровотечі) і проведення штучної вентиляції легень (рот у рот, рот у ніс, S-подібна трубка тощо);
- закритий масаж серця;
- введення знеболюючих засобів за допомогою шприц-ттюбіку;
- накладання асептичної пов'язки на рану і опікову поверхню, накладання окклюзійної пов'язки при проникаючих пораненнях грудної клітини з використанням прогумованої оболонки індивідуального перев'язувального пакета;
- іммобілізацію ушкодженої ділянки тіла найпростішими засобами з використанням табельних і підручних засобів;
- надівання протигазу при перебуванні на зараженій місцевості;
- введення враженим отруйними речовинами антидотів;
- часткова санітарна обробка; введення антибіотиків, сульфаніламідних препаратів, протиблювотних засобів з AI-2;
- дегазація заражених ділянок шкіри та одягу, що до неї прилягає, за допомогою індивідуального протихімічного пакету. [2].

Для успішного результату замало лише бажання надати допомогу, – потрібно мати практичні навички та знати чіткий алгоритм дій.

Дедалі більше підприємств організують навчання своїх працівників, залучаючи до цього інструкторів з домедичної допомоги. Нажаль не всі інструктори, які прибувають на підприємство, мають практичний досвід надання першої допомоги та вміють якісно й доступно подати інформацію та практичні навички слухачам [1].

Над проблемою домедичної допомоги потерпілим працювали такі зарубіжні та вітчизняні вчені: Акулова О.М., Безпалій В.В., Василенко В.М., Волянський П.Б., Гур'єв С.І., Гулай А.М., Кочин І.В., Литвин Ю.П., Лермонтова Ю.О., Сидоренко П.І., Терент'єва А.В., та інші. Проте це питання є актуальним у нашій державі.

Нормативно-правову базу України з домедичної допомоги складають:

Закон України від 05.07.2012 р. № 5081-VI «Про екстрену медичну допомогу» [3].

У статті 1 наводиться визначення домедичної допомоги, це: невідкладні дії та організаційні заходи, які направлені на врятування та збереження життя та здоров'я людини у невідкладному стані та зменшення наслідків дії на їх здоров'я, що надають пересічні громадяни або рятівники які не мають медичної освіти.

Статтею 12 визначаються особи, які зобов'язані надавати домедичну допомогу, це: рятувальники аварійно-рятувальних служб, працівники державної пожежної охорони, працівники органів та підрозділів міліції, фармацевтичні працівники, провідники пасажирських вагонів, бортпровідники та інші особи, які не мають медичної освіти, але за своїми службовими обов'язками повинні володіти практичними навичками надання домедичної допомоги.

Статтею 15 визначена відповідальність за порушення законодавства у сфері надання екстреної медичної допомоги – особи, винні у порушенні положень цього Закону, у порядку, встановленому законом, несуть дисциплінарну, адміністративну, кримінальну або цивільно-правову відповідальність за ненадання без поважних причин на місці події домедичної допомоги або необгрунтовану відмову в її наданні. Тобто, співробітники аварійно-рятувальних служб та працівники державної пожежної охорони, а також працівники інших міністерств та відомств підпадають у разі ненадання домедичної допомоги (або не якісного надання) до відповідальності згідно зі статтею 367 (службова недбалість) Кримінального кодексу України.

Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI «Кодекс цивільного захисту України» [4].

Статтею 17 пункт 22 визначено, що центральний орган виконавчої влади, який забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері цивільного захисту, здійснює ліквідацію медико-санітарних наслідків надзвичайних ситуацій та надає екстрену медичну допомогу у зоні НС (осередку ураження) постраждалим та рятувальникам, заходи з медичного забезпечення (лікувально-профілактичні, санітарно-гігієнічні, медичне постачання та санаторно-курортне лікування) осіб рядового і начальницького складу, ветеранів служби цивільного захисту (війни) та членів їхніх сімей.

Статтею 23 пунктом 8 на аварійно-рятувальну службу покладено виконання таких завдань як: пошук і рятування людей на уражених об'єктах і територіях, надання у можливих межах невідкладної, у тому числі медичної, допомоги особам, які перебувають у небезпечному для життя й здоров'я стані, на місці події та під час евакуації до лікувальних закладів.

Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження порядку підготовки та підвищення кваліфікації осіб, які зобов'язані надавати першу допомогу» від 21 листопада 2012 р. № 1115. Визначає процедуру підготовки та підвищення кваліфікації осіб, які згідно із своїми службовими обов'язками зобов'язані володіти знаннями і практичними навичками надання домедичної допомоги особам, які перебувають у невідкладному стані [5].

Наказом МОЗ України від 18.03.2005 р. № 120 «Про організацію навчання медичних та немедичних працівників з надання медичної допомоги в екстрених ситуаціях» затверджено:

Уніфіковану програму підготовки медичних працівників системи швидкої медичної допомоги та служби медицини катастроф з невідкладної медичної допомоги у надзвичайних ситуаціях.

Уніфіковану програму медичної підготовки рятувальників та інших фахівців, які беруть участь у ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій і не мають медичної освіти.

Уніфіковану програму підготовки викладачів - інструкторів з надання медичної допомоги в екстремальних ситуаціях [6].

Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах» від 16 червня 2014 р. № 398 та наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про вдосконалення підготовки з надання домедичної допомоги особам, які не мають медичної освіти» від 29 березня 2017 р. № 346.

Чинними нормативними документами передбачено певні кваліфікаційні вимоги до осіб, що надають навчальні послуги з надання домедичної допомоги.

Відповідно до Теми 7 «Надання домедичної допомоги потерпілим у разі нещасного випадку» додатку 4 до п. 5.1 Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05), затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 26 січня 2005 р. № 15, навчання повинні проводити фахівці з медичною освітою.

Проте наявність медичної освіти не дає безумовного права на надання цих послуг.

У Довіднику кваліфікаційних характеристик професій працівників: Інструктор з надання догоспітальної допомоги має певні завдання та обов'язки. Керується Конституцією України, чинним законодавством України, іншими нормативно-правовими актами, що визначають діяльність закладів охорони здоров'я; здійснює методичне забезпечення і координацію роботи акредитованого навчально-тренувального структурного підрозділу установи, на базі якої проводиться навчання окремих категорій немедичних працівників та всіх, хто виявив бажання, надання догоспітальної допомоги; розробляє та готує навчальні матеріали відповідно до затверджених навчальних програм; організовує навчально-тренувальний процес, комплектує навчальні групи; аналізує результати навчально-тренувального процесу; сприяє комунікації між слухачами і координатором навчального центру; веде статистичний облік результатів роботи навчально-тренувального структурного підрозділу, етапів підготовки, узагальнює результати роботи; дотримується правил особистої та громадської безпеки і правил охорони праці; володіє прийомами реанімації, вміє надавати допомогу при травмах, кровотечах, серцево-судинних захворюваннях, колапсі, отруєнні, утепленні, механічній асфіксії, анафілактичному шоці, термічних та хімічних ураженнях, алергічних станах; дотримується принципів медичної деонтології; постійно удосконалює свій професійний рівень [7].

Інструктор з надання догоспітальної допомоги має знати Конституцію України, чинне законодавство України про охорону здоров'я та інші нормативні документи, що регламентують діяльність закладів охорони здоров'я; права, обов'язки і відповідальність інструктора з надання догоспітальної допомоги; міжнародну класифікацію хвороб; клінічні настанови (протоколи) з медицини невідкладних станів та надання екстреної медичної допомоги; основи анатомії, патологічної анатомії, фізіології та патологічної фізіології людини; основи внутрішньої медицини, педіатрії, хірургії, акушерства та гінекології, травматології, урології, інфектології; імунології, етіологію та патогенез найбільш поширених захворювань, методи їх діагностики та принципи лікування; основні методи серцево-легеневої реанімації; особливості реанімації та інтенсивної терапії у дітей і новонароджених; принципи ведення фізіологічних пологів та розпізнавання патологічних; фармакологічну дію поширених лікарських речовин, показання та шляхи введення, їх сумісність, дозування; принципи роботи з наркозно-дихальною та іншою апаратурою, що застосовується бригадою екстреної медичної допомоги; принципи надання медичної допомоги потерпілим при надзвичайних ситуаціях з великою кількістю постраждалих, а також при виявленні особливо небезпечних інфекцій; правила оформлення медичної документації; правила медичної етики і деонтології, комунікації між співробітниками та іншими службами; правила безпеки під час роботи з медичним інструментарієм і обладнанням.

Щодо кваліфікаційних вимог, то вони висуваються відповідно до кваліфікаційної категорії.

Інструктор з надання догоспітальної допомоги вищої кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей галузі знань «Охорона здоров'я». Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння (підтвердження) вищої кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 10 років.

Інструктор з надання догоспітальної допомоги I кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей галузі знань «Охорона здоров'я». Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння (підтвердження) I кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 7 років.

Інструктор з надання догоспітальної допомоги II кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей галузі знань «Охорона здоров'я». Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння



(підтвердження) II кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 5 років.

Інструктор з надання догоспітальної допомоги: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей галузі знань «Охорона здоров'я». Наявність досвіду практичної роботи у сферах охорони здоров'я, цивільної безпеки, соціального захисту - не менше 2 років. Наявність сертифіката закладу, акредитованого МОЗ України, про проходження навчання за програмою підготовки за кваліфікацією «Інструктор з надання догоспітальної допомоги».

Окрім інструктора з надання догоспітальної допомоги у Довіднику кваліфікаційних характеристик професій працівників є ще інструктор з надання першої допомоги [7].

Його завдання та обов'язки: керується Конституцією України, чинним законодавством України, іншими нормативно-правовими актами, що визначають діяльність закладів охорони здоров'я; здійснює методичне забезпечення і координацію роботи акредитованого навчально-тренувального структурного підрозділу установи, на базі якої проводиться навчання окремих категорій немедичних працівників та всіх, хто виявив бажання, надання першої допомоги; розробляє та готує навчальні матеріали відповідно до затверджених навчальних програм; організовує навчально-тренувальний процес, комплектує навчальні групи; аналізує результати навчально-тренувального процесу; сприяє комунікації між слухачами і координатором навчального центру; веде статистичний облік результатів роботи навчально-тренувального структурного підрозділу, етапів підготовки, узагальнює результати роботи; дотримується правил особистої та громадської безпеки і правил охорони праці; володіє прийомами реанімації, вміє надавати допомогу при травмах, кровотечах, серцево-судинних захворюваннях, колапсі, отруєнні, утопленні, механічній асфіксії, анафілактичному шоці, термічних та хімічних ураженнях, алергічних станах; дотримується принципів деонтології; постійно удосконалює свій професійний рівень.

Інструктор з надання першої допомоги повинен знати: Конституцію України, чинне законодавство України про охорону здоров'я та інші нормативні документи, що регламентують діяльність закладів охорони здоров'я; права, обов'язки і відповідальність інструктора з надання першої допомоги; основи анатомії, патологічної анатомії, фізіології та патологічної фізіології людини; основи травматології, інфектології; імунології; основні методи серцево-легеневої реанімації; особливості реанімації у дітей і новонароджених; принципи ведення фізіологічних пологів та розпізнавання патологічних; принципи сортування та надання першої допомоги потерпілим при надзвичайних ситуаціях з великою кількістю постраждалих; правила етики і деонтології, комунікації з службами екстреної допомоги населенню; правила безпеки під час роботи з медичним обладнанням.

Для інструктора з надання першої допомоги також висуваються певні кваліфікаційні вимоги відповідно до кваліфікаційної категорії.

Інструктор з надання першої допомоги вищої кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей. Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння (підтвердження) вищої кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 10 років.

Інструктор з надання першої допомоги I кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей. Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння (підтвердження) I кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 7 років

Інструктор з надання першої допомоги II кваліфікаційної категорії: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей. Підвищення кваліфікації (курси удосконалення тощо). Наявність посвідчення про присвоєння (підтвердження) II кваліфікаційної категорії з цієї кваліфікації. Стаж роботи за фахом - понад 5 років.

Інструктор з надання першої допомоги: вища освіта за ступенем молодшого бакалавра з будь-яких спеціальностей. Наявність сертифіката закладу, акредитованого МОЗ України, про проходження навчання за програмою підготовки за кваліфікацією «Інструктор з надання першої допомоги». Наявність досвіду надання першої допомоги [7].

На сьогодні законодавством передбачені програми підготовки та підвищення кваліфікації I, II, III рівнів, які мають, відповідно, 8, 48, 120 навчальних годин. Навчальна година складає 60 хвилин. Тривалість щоденного навчання не має перевищувати 8 годин (накази Міністерства охорони здоров'я України «Про організацію навчання окремих категорій немедичних

працівників навичкам надання першої невідкладної медичної допомоги» від 2 березня 2009 р. № 132 та «Про удосконалення підготовки з надання домедичної допомоги осіб, які не мають медичної освіти» від 29 березня 2017 р. № 346) [1].

Періодичність підвищення кваліфікації немедичних працівників встановлена 1 раз на 3 роки.

Основою всіх тренінгів має бути «алгоритм базової підтримки життя» (Basic Life Support) [8].

Алгоритм базової підтримки життя (Basic Life Support)

1. Розпізнавання зупинки дихання та кровообігу.
2. Порядок виклику бригади швидкої допомоги.
3. Проведення якісної серцево-легеневої реанімації.
4. Використання АЗД (автоматичного зовнішнього дефібрилятора).
5. Допомога при обструкції дихальних шляхів стороннім тілом (прийом Геймліха) [8].

Також необхідно відпрацьовувати навички щодо:

– зупинки кровотечі з кінцівок методом прямого тиску на рану, накладання тиснучої пов'язки та джгута (Есмарха та турнікету);

– допомоги при:

- травмах опорно-рухового апарату (забої, вивихи та переломи);
- термічних ураженнях;
- судомах;
- порушеннях мозкового кровообігу (інсульту) та серцевого (інфаркту).

Основною умовою успішного навчання є відпрацювання навичок в умовах навчальної симуляції: командна робота з надання допомоги в різних ситуаціях.

Проходження навчання раз на рік та перепідготовка працівників дасть змогу зменшити тяжкість травматизму та кількість потерпілих від нещасних випадків у разі надзвичайної ситуації чи загострення хвороби.

Для збереження навичок та удосконалення працівникам рекомендується після проходження курсу проходити Refresh-тренінги не рідше раз на рік після проходження курсу. Це дасть можливість поновити практичні навички та визначити приховані недоліки системи реагування на надзвичайні ситуації.

Ще одним основним аспектом є аптечка з домедичної допомоги. Вона має бути укомплектована відповідно до специфіки даного виробництва та надати можливість зберегти життя і здоров'я потерпілого до прибуття фахівців екстреної медичної допомоги. Перед формуванням набору в аптечку потрібно залучити «аудит» із питань домедичної допомоги та виявити ті загрози й можливі ураження, що можуть бути на території цеху, виробничого майданчика та в приміщеннях підприємства [9].

Місця розташування аптечки мають бути враховані та оптимізовані таким чином, щоб від місця події до аптечки можна було дістатися за найкоротший проміжок часу. Як приклад, на кожному підприємстві є пожежні щити та розташовані вогнегасники. А отже, аптечки домедичної допомоги треба розташовувати в тих же місцях з обов'язковим позначанням міжнародним знаком First Aid (білий хрест на зеленому тлі).

Яким би повним та об'ємним не був набір «Аптечки домедичної допомоги», його якість використання залежить від людей — працівників підприємства. Якщо працівник не проходив відповідних навчань з домедичної допомоги та цей набір він отримав уперше, це вкрай негативно позначиться на часі та якості надання першої допомоги постраждалому.

Будь-який набір аптечки потрібно розбирати на навчання, працівники повинні вміти користуватися тими медикаментами та приладами, що містяться в цьому наборі.

Найчастіше на виробництві людина зазнає таких пошкоджень, як:

- раптова зупинка кровообігу внаслідок серцевої недостатності або інсульту;
- поранення з критичною кровотечею (венозною та артеріальною);
- опіки різних частин тіла та обличчя;
- травми опорно-рухового апарату;
- пошкодження хребта.

Основні принципи надання першої допомоги:

- правильність і доцільність (якщо ви не впевнені в своїх діях – краще утриматись; головне правило першої допомоги – не нашкодити);
- швидкість;

- продуманість, рішучість, спокій.

Алгоритм дій має бути таким:

1. Оглянути місце події та впевнитись у тому, що надання допомоги буде безпечним: забезпечити власну безпеку, а також безпеку потерпілого та людей навколо.
2. Оцінити стан постраждалого (свідомість, дихання, пульс).
3. За необхідності викликати бригаду екстреної (швидкої) медичної допомоги, а також інші екстрені служби (поліцію, аварійно-рятувальну службу, службу газу тощо).
4. Оцінити наявність критичних кровотеч та зупинити їх.
5. Забезпечити прохідність дихальних шляхів.
6. Якщо у постраждалого відсутні ознаки життя та немає критичної кровотечі (або ви вже її ліквідували) – розпочати серцево-легеневу реанімацію.
7. Перевести постраждалого у стабільне положення (на боці, обличчям до себе, рука під головою, нога зігнута в коліні), якщо не йдеться про підозру на травми хребта та кісток тазу і серцево-легенева реанімація була вдалою.
8. Не залишати постраждалого та контролювати стан його життєвих функцій до прибуття екстрених служб.

**Висновки.** Є нагальна необхідність вивчити закордонний досвід, так як наразі це питання майже не розглядалось дослідниками.

Нажаль в Україні питання навчання та уміння надання першої допомоги практично не вирішено. Тому проведення навчання є необхідним на будь якому підприємстві, а особливо це стосується виробничих сфер.

Кожен свідомий українець повинен пройти курси з надання першої допомоги і отримати практичні навички. Адже саме ці навички можуть врятувати чиесь життя в критичній ситуації.

#### Інформаційні джерела

1. Картавий О. Усе про домедичну допомогу // Охорона праці. – №11. – 2019.
2. Волянський П.Б. Домедична допомога як складова сучасної системи реагування на надзвичайні ситуації / П. Б. Волянський, А. М. Макаренко. // Державне управління: удосконалення та розвиток № 12, 2015.
3. Закон України від 05.07.2012 р. № 5081-VI «Про екстрену медичну допомогу».
4. Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI «Кодекс цивільного захисту України».
5. Постанова Кабінету Міністрів України від 21 листопада 2012 р № 1115 «Порядок підготовки та підвищення кваліфікації осіб, які зобов'язані надавати до медичну допомогу».
6. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 18.03.2005 р № 120 «Про організацію навчання медичних та немедичних працівників з надання медичної допомоги в екстрених ситуаціях».
7. Довіднику кваліфікаційних характеристик професій працівників Випуск 78 «Охорона здоров'я», затвердженому наказом Міністерства охорони здоров'я України від 29 березня 2002 р. № 117, зі змінами, внесеними наказом Міністерства охорони здоров'я України від 9 серпня 2017 р. № 918.
8. Картавий О. Організація навчання з домедичної допомоги на підприємстві . / О.Картавий // «Охорона праці і пожежна безпека» №7, 2019/
9. Картавий О. Комплектація аптечки для надання домедичної допомоги (для виробничих підрозділів машинобудівної галузі). / О. Картавий, Т. Білько // «Охорона праці і пожежна безпека» №2, 2019.

**Висын Е.А., Федорчук-Мороз В.И.**

#### ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ДОМЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

*В статье освещены основные аспекты домедицинской помощи. Приведенная нормативно - правовая база основы проведения обучения по домедицинской помощи. Освещены программы по которым проводится обучение с домедицинской помощи пострадавшему и приведен перечень навыков, которыми должны овладеть слушатели после окончания учебы. В Украине средний показатель смертности в результате чрезвычайных ситуаций - 130-135 человек на 100 тыс. Населения (по данным ДСНС), что в 3-5 раз превышает показатели стран Европы.*

*На догоспитальном этапе умирает 76% пострадавших, в больницах - 24%. В развитых странах мира на догоспитальном этапе умирает 28%, в больницах - 72%.*

© **Висин О.О., Федорчук-Мороз В.И.**

*Так происходит потому, что из 100 человек, умерших на догоспитальном этапе, примерно 20% получили несовместимые с жизнью травмы, а смерть 80% пострадавших наступила в результате неэффективной эвакуации в лечебные учреждения и неправильно организованной домедицинской помощи непосредственно в зоне чрезвычайной ситуации. Если рядом с травмированным нет человека, который по своим служебным обязанностям должна обладать основными навыками по спасению и сохранению жизни, оказывать помощь должен тот, кто поблизости. Действия спасителя должны быть быстрыми, продуманными, решительными и целесообразными. Нужно уметь делать это правильно, ведь главный принцип при предоставлении домедицинской помощи не навредить. Хотя в чрезвычайную ситуацию сохранять спокойствие достаточно сложно, поможет в этом четкое осознание того, что делаешь и с какой целью.*

**Ключевые слова:** домедицинской помощь, обучение, умение, нормативно-правовая база, аптечка.

**Visyn E.A., Fedorchuk-Moroz V.I.**

#### **BASIC ASPECTS OF HOME CARE**

*The article highlights the main aspects of home care. The legal and legal basis for conducting training in domedical assistance is given. The programs that provide training in domedic assistance to the victim are outlined and a list of skills that trainees need to master after graduation.*

*In Ukraine, the average mortality rate due to emergencies is 130-135 people per 100,000 population (according to the SESP), which is 3-5 times higher than in Europe.*

*At pre-hospital stage, 76% of victims die, in hospitals - 24%. In developed countries, 28% die in the pre-hospital phase, and 72% in hospitals.*

*This is because, out of 100 people who died in the pre-hospital phase, approximately 20% were incompatible with life trauma, and the deaths of 80% of the victims were due to inefficient evacuation to medical institutions and improperly organized domedic care directly in the emergency area.*

*If there is no person next to the injured person who must have basic practical life-saving and life-saving skills in their duties, then someone nearby should help. The lifeguard's actions must be fast, thoughtful, decisive and appropriate. You need to be able to do it right, because the main principle when providing domedic help is not to hurt.*

*Although it is difficult to keep calm in an emergency, it will help in this clear understanding of what you are doing and for what purpose.*

**Keywords:** domedic assistance, training, skills, legal framework, first aid kit.

УДК 621.717.112.6

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-3>Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н., доц.  
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

### МОДУЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

*Значне підвищення ефективності виробництва в приладобудуванні дає застосування модульної технології при наявності використання модульних конструкцій приладів тощо. Під модульним принципом розуміється побудова різних технічних систем приладобудування з різноманітними характеристиками шляхом компоновки їх з типових модулів обмеженої номенклатури. Під модулем розуміється однозначний стабільний елемент, який описується мінімальним набором характеристик і відрізняється обмеженою номенклатурою та розділяється на свої різновиди за прийнятими критеріями. Це конструкційні, технологічні, організаційні, експлуатаційні, економічні, розрахункові та інші модулі, що представляють новий напрямок розвитку приладобудування. Описати їх класифікацію можна з допомогою 3D-матриць. Сутність її полягає в представленні модуля трьома напрямками розширення характеристик кожного елемента, котрі також представляються своєю тріадою і т.д. до повного його описання. В основу формування таких модулів покладається конструкція приладів, спосіб її виготовлення, виконання рухів і дій при складанні, технологічне розчленування необхідних робіт тощо. Їх структура залежить від конструкційних, технологічних, організаційних і інших чинників.*

**Ключові слова:** модуль, різновиди, класифікація, матриця 3D.

**Вступ.** Розробка модульних технологій є новим напрямком в приладобудуванні, а її основою виступають модулі, з яких компонується як технологічні процеси, так і технологічне обладнання з оснащенням. Поняття модуля відоме давно, як і його використання. Найбільш загальне поняття модуля було сформульоване Бор-Раменським [1] - модуль це цілісність, спряжена з іншими елементами (об'єктами) структури так, що можлива її оперативна заміна на іншу цілісність того ж функціонального призначення. Модульний принцип в машинобудуванні запроваджений Васильєвим А.Л. [2], який його визначає, як особливість побудови технічних систем і полягає в підпорядкуванні їх розмірів проектним модулям, забезпеченні можливості комплектування різноманітних складних нестандартних технічних систем з великою різноманітністю характеристик з невеликої, економічно обґрунтованої кількості типів і типорозмірів однакових первинних загальних модуль-елементів. Більш чітко визначення дав Базров Б.М. [3], який вважається розробником модульної технології обробки деталей машин. У Базрова Б.М. під модульним принципом розуміється побудова різних технічних систем з різноманітними характеристиками шляхом компоновки їх з типових модулів обмеженої номенклатури, а під модулем – однозначний стабільний елемент, який описується мінімальним набором характеристик і відрізняється невеликою номенклатурою.

Базров Б.М. при класифікації модулів машинобудівних виробів передбачає їх поділ на модулі проектні (простору, співвідношення розмірів) та фізичні (функціональні та конструктивні) з відповідною їх градацією на лінійні, площинні, об'ємні, золотого січення, зубчатого колеса, відношення довжини до діаметру, технологічні, обслуговування, деталі, складальної одиниці, модулі з'єднання з виділенням базових модулів поверхні, посадки з'єднання, матеріалу з'єднання, часу виконання з'єднання та виду модульного технологічного процесу складання. Будь-яка деталь виробів може бути представлена 26 найменуваннями модулів поверхні і 14 базових модулів, а їх з'єднання 7 модулями. Виділені модулі спряження, технологічного процесу складання, технологічних баз, обладнання, інструментального налагодження, пристрою, що дозволило створити елементну базу технологічного забезпечення на модульному рівні. Такий підхід є більш конструкційним, ніж технологічним. Це мабуть є наслідком охоплення якомога більшого кола питань, особливо загальних для складання.

Таким чином, метою даної роботи є розробка класифікації складальних модулів, як найбільш складних і відповідальних, і її опис за допомогою матриць з довільним розширенням.

**Викладення основного матеріалу.** Якщо підходити до класифікації складальних модулів з точки зору виробництва виробів і їх експлуатації (життєвого циклу), то основними модулями будуть: конструкційні, технологічні, технологічних засобів, організаційні, експлуатаційні та економічні, котрі розділяються на свої різновиди за прийнятими критеріями (рис. 1). Під складальним модулем розуміється добре відпрацьована зоптимізована конструкційна, технологічна, організаційна чи експлуатаційна складальна одиниця багаторазового користування обмеженої номенклатури з характерними рисами автономності, стикувальності,



Рис. 1. Класифікація різновидів складальних модулів в приладобудуванні

зв'язаності та надмірності.

Так конструкційні можуть бути модулями деталей та вузлів, поверхонь, (окремо базових і робочих поверхонь), їх властивостей та взаємодії базових, робочих і зв'язуючих поверхонь в вузлі. Класифікація конструкційних модулів добре розроблена у Базрова Б.М. і тому може бути лише доповнена. Ці модулі мають вирішальне значення в забезпеченні якості виробів, на що мало звертають увагу. Особливе місце займають розрахункові модулі за видами потрібних розрахунків, які напряду зв'язані крім конструкційних з усіма модулями, де такі розрахунки потрібні. Технологічні модулі складаються як з модулів розчленування складальних робіт під майбутні модулі та формування структури модульних операцій, так і в основному відповідно елементів складальної операції: модулі завантаження, подачі, базування, просторового орієнтування, закріплення, взаємного орієнтування, спряження, фіксації, контролю, зняття та переміщення складеного вузла, виробу. Модулі технологічних засобів – це в основному конструкційні модулі технологічного обладнання, пристроїв, контрольно-вимірних засобів, їх налагодження, допоміжних засобів і т.п. Особливе місце займають виконавчі модулі, класифіковані за характером чи принципом дії. Наприклад, адаптивні, самопошукові, пневмовихрвові, механічні, пневматичні, електромагнітні та інші для складання окремих видів з'єднань, нанесення речовин (клеїв, тощо), спеціальні. Обов'язкове виділення транспортних модулів і модулів якості. Транспортні модулі описують технологічні переміщення деталей, вузлів, виробів за їх технологічними процесами виготовлення, а модулі якості відносяться як до забезпечення якості складаних виробів, так і якості функціонування технологічного обладнання та оснащення, персоналу.

Організаційні модулі охоплюють основні питання організації модульного складального виробництва від встановлення організаційної форми роботи, компоновки технологічного та допоміжного обладнання, апаратури до організації транспортних потоків, робочих місць і т.п., які складаються з більш простих елементарних модулів. До експлуатаційних відносяться модулі обслуговування, діагностики, підналагодження обладнання з оснащенням, ремонту, запасних частин, рециклінгу та інші.

Економічні модулі включають модулі визначення витрат виробництва, технологічної собівартості, економічного ефекту, інших економічних розрахунків, а в загальному економічного обґрунтування прийнятих рішень при проектуванні конструкції виробу чи технологічного обладнання з оснащенням, розробці технологічних процесів виготовлення виробів, їх оптимізації.

В загальному складальний модуль є закінченою частиною певного обсягу робіт, стикується з іншими функціональними модулями і характеризується автономністю, універсальністю, переналагоджуваністю та надлишковістю [4]. Надлишковість необхідна для охоплення більш широкого діапазону виробів модульного складання, але вона повинна завжди бути технологічно та економічно узasadненою. Кожному різновиду модуля має повністю відповідати інший різновид і це є підставовою засадою модульної складальної технології, оскільки формуються вони паралельно, забезпечуючи єдність технології, конструкції та організації.

На формування складальних модулів головний вплив мають: конструкція виробу, складальних з'єднань, технічні вимоги, програма випуску, переналагоджуване складальне обладнання та оснащення і т.п., тобто всі первинні вхідні дані: особливості переналагодження модульної технології, технологічні можливості переналагоджуваного складального обладнання та оснащення, степiнь концентрації модульної технології, рівень технологічності конструкції виробів, рівень автоматизації, тощо.

Класифікація складальних модулів може бути виконана за принципом об'ємної кубічної матриці, або матриці 3D. Сутність її полягає в представленні модуля трьома напрямками розширення характеристик кожного елемента, котрі також представляються своєю трійкою і т.д. до повного його описання. Наприклад, модуль  $A$  описується трьома напрямками підставових характеристик  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{13}$ , кожна з яких уточнюється наступною трійкою і т.д., тобто кожний модуль представляється матрицею

$$M = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{n3} \end{vmatrix},$$

де:  $A_{i3}$  - характеристики модуля по  $n$  ієрархічних рівнях. При такому підході до класифікації модулі легко програмуються, математично обробляються, що є перевагою, а саме її можливістю необмеженого розширення, тобто абсолютно повного опису.

Першою трійкою характеристик модуля деталі є підставові особливості конструкції, технології та організації, котрі в свою чергу уточнюються своїми трійками. Так відомі різні класи складаних деталей, матеріалів, що застосовуються, їх маса. Основними поверхнями складаних деталей, як відомо, є базові, орієнтуючі та робочі, котрі за своїм різновидом можуть бути різними, які в свою чергу уточнюються наступними трійками за вибраними потрібними класифікаційними критеріями. Це ж саме можна віднести і до розмірів деталі.

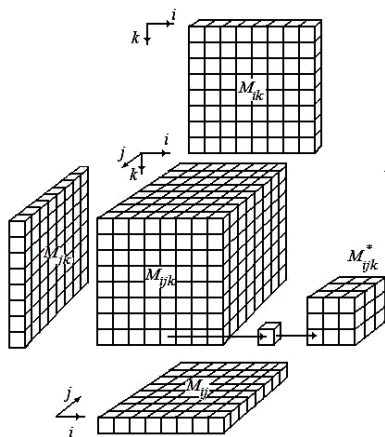


Рис. 2. Схема формування матриці 3D характеристик складальних модулів

Модуль складального з'єднання описується також трійками характеристик, які можуть бути необмежено розширеними. Перша трійка - це посадка (з гарантованим зазором, натягом і перехідна), розміри з'єднання - мало-, середньо- та великогабаритні, та особливості - механічні з'єднання, зварювані чи спаювані, одержані з додатковим елементом (клеєні з пружним елементом, замазкою), тощо. Кожна з вказаних характеристик має можливість уточнення, наприклад, механічні з'єднання можуть бути циліндричними, плоскими і фасонними і т.д. Останні підрозділятимуться на різьбові, шліцьові, комбіновані, тощо.

Основними елементами модульної складальної технології є складальні модулі, котрі математично записуються матрицею 3D, скомпонованою з звичайних (рис. 2). Об'ємна матриця  $M_{ijk}$  описує загальну класифікацію складальних модулів за вибраними критеріями в трьох напрямках. Передня вертикальна матриця  $M_{jk}$  описує різновиди модулів за типом складального з'єднання (напрямок  $j$ ) і формою з'єднаних поверхонь ( $k$ ). Будь-який елемент цієї матриці, наприклад, з'єднання з циліндричними поверхнями уточнюється за двома іншими критеріями, розміром і точністю, що творить верхню горизонтальну матрицю  $M_{ij}$ , а її елемент є початком бокової вертикальної матриці  $M_{ik}$ , що конкретизує спосіб складання та продуктивність.

**Висновок.** В основу формування складальних модулів в приладобудуванні покладається модульна конструкція приладів, спосіб виконання складальних рухів і дій, технологічне розчленування складальних і інших робіт. Їх структура залежить від конструкційних, технологічних, організаційних і інших чинників. Опис модулів виконується послідовним рядом об'ємних матриць 3D, які розкривають його параметри.

### Список літератури

1. Бор-Раменский А.Е. Технологические и технические модули автоматизированных производств / А.Е. Бор-Раменский. - Л.: Наука, 1989. - 210 с.
2. Васильев А.Л. Модульный принцип формирования техники / А.Л. Васильев - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 238 с.
3. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. - М.: Машиностроение, 2001. - 368 с.
4. Григор'єва Н.С. Науково-технологічні основи гнучкого модульного автоматичного складання виробів: Монографія. –Луцьк: Надстир'я, 2008. -520 с.

**Григор'єва Н.С, д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н., доц.**  
Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина

### МОДУЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

*Значительное повышение эффективности производства в приборостроении дает применение модульной технологии при использовании модульных конструкций приборов и тому подобное. Под модульным принципом понимается построение различных технических систем приборостроения с различными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры. Под модулем понимается однозначный стабильный элемент, который описывается минимальным набором характеристик и отличается небольшой номенклатурой, разделяется на свои разновидности по принятым критериям. Это конструкционные, технологические, организационные, эксплуатационные, экономические, расчетные и другие необходимые модули, представляющие новое направление развития приборостроения. Описать их классификацию можно с помощью 3D-матриц. Суцність її заключається в представленні модуля трьома напрямками розширення характеристик кожного елемента, котрі також представляються своєю триадою і т.д. до повного його описання. В основу формування таких модулів закладається конструкція приборів, спосіб їх виготовлення, виконання рухів і дій при зборці, технологічне розчленування необхідних робіт і тому подобное. Їх структура залежить від конструкційних, технологічних, організаційних і інших факторів.*

**Ключевые слова:** модуль, разновидности, классификация, матрица 3D

**N. Grigorieva, DSc, PhD, Eng, V. Shabaikovich, DSc, PhD, Eng, I. Marchuk, Ph.D., Assoc.Prof.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

### MODULAR TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION

*A significant increase in production efficiency in instrument making is the use of modular technology in the presence of the use of modular device structures and the like. The modular principle refers to the construction of different technical instrumentation systems with different characteristics by composing them from typical modules of a limited nomenclature. The module refers to a single stable element, which is described by a minimum set of characteristics and differs by a limited nomenclature and is divided into its varieties according to the accepted criteria. These are structural,*

© Григор'єва Н.С, д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н., доц.



*technological, organizational, operational, economic, calculation and other modules that represent a new direction of instrument development. You can describe their classification using 3D matrices. Its essence lies in the modules presented in three directions of extension of the characteristics of each element, which are also represented by their own triad, etc. to its full description. The design of such modules is based on the design of devices, the method of its manufacture, the execution of movements and actions during assembly, technological dismemberment of necessary works, etc. Their structure depends on structural, technological, organizational and other factors.*

**Keywords:** *module, varieties, classification, 3D matrix.*

УДК 628.517

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-4>

Даниленко О.В., к.т.н., Верба І.І., к.т.н., Самойленко О.В., к.т.н.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

## ДІАГНОСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ОБЛАДНАННЯ ЯК ПЕРЕДУМОВА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЙОГО ПРАЦЕСПРОМОЖНОСТІ

**Анотація.** Збільшення в промисловості частки дрібних підприємств призводить до ускладнення організації підтримання обладнання в робочому стані. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є постійний моніторинг стану обладнання. Достатньо простим і в той же час інформативним є аналіз віброакустичної активності машин. Періодичне створення „вібраційних портретів“ машини дозволяє їх порівнянням визначити тенденції в змінах стану ланок кінематичного ланцюга. Збільшення швидкості наростання інтенсивності вібрацій, що генеруються певними складовими машини, є підставою для перевірки таких деталей і виключення аварійних зупинок (поломок) машин.

**Ключові слова:** діагностика стану обладнання, „вібраційний портрет“ машини, розрахунок частот коливань, спектральний аналіз, ідентифікація джерел коливань.

**Вступ.** Безвідмовне функціонування металорізальних верстатів (і технологічного обладнання взагалі) потребує постійного моніторингу (визначення) його поточного стану з метою визначення можливих загроз виникнення аварійних відмов. Необхідність таких заходів обумовлена збільшенням частки дрібних підприємств а через це – неможливістю організації ремонтних служб, здатних здійснювати в повному обсязі вимоги системи технічного обслуговування і ремонту (перш за все системи планово запобіжних ремонтів).

**Постановка проблеми.** Виходом з цієї ситуації є здійснення регулярної діагностики стану обладнання з використанням доступних методів (органолептичних, інструментальних). При органолептичній діагностиці визначаються наявність, місця і характер вібрацій, шумів, підвищеного нагрівання та ін. але, звичайно, порівняння одержаних даних (особливо здійснених через деякі проміжки часу) буде суб'єктивним і, ймовірно, не точним. Інструментальні методи дозволяють не тільки здійснювати аналіз, а й зберегти результати вимірювання для подальшого порівняння. Необхідність порівняння обумовлена тим, що одноразова діагностика дозволяє визначити надмірні збільшення енергії коливань на окремих частотах, що свідчить про наявність дефектів в кінематичних ланках, які ці частоти генерують, але не дозволяє оцінювати швидкість зношування деталей. Визначення темпів зношування деталей дозволяє перейти до прогнозування технічного стану машини і визначити коли буде необхідно ремонтувати ту чи іншу деталь.

Отже в умовах недоцільності застосування у повному обсязі системи планово-попереджувальних ремонтів необхідно періодично робити „вібраційний портрет“ машини, тобто визначати частоти, на яких енергія коливань підвищена, та заносити ці відомості до таблиці або будувати за одержаними даними графіки. Останній варіант подібний до спектрограм, але спектрограм в яких залишені лише піки з підвищеною енергією, що можуть викликати підозру на наявність дефектів або просто ті, що відповідають частотам, пов'язаним з конкретними кінематичними ланками. Як зразок форми реєстрації результатів діагностики можна використати форму запропоновану у статті [1].

**Аналіз досліджень та рекомендацій.** Ідентифікація джерел коливань (ланок кінематичного ланцюга) може здійснюватися при умові попереднього розрахунку частот коливань, притаманних конкретним деталям. Можливі частоти коливань, що генеруються в машині, визначаються виходячи з конструкції складових машини і особливостей взаємозв'язків між її деталями за відомими формулами [1-3].

Кінематичний ланцюг верстата одержує рух від електричного двигуна, який живиться від електричної мережі змінного струму з частотою 50 Гц. Це викликає збурення, обумовлені переманічуванням активного металу з частотою:

$$f_m = 2 \times f_c, \quad (1)$$

де  $f_c$  – частота струму мережі живлення.

Наявність змінного магнітного викликає пульсації магнітного потоку в повітряному зазорі електродвигуна:

$$f_{\text{пульс}} = f_c \times [(2 \text{ або } 0) + z_r \times R/p \times (1 - S)], \quad (2)$$

де  $z_r$  – кількість зубців ротора електродвигуна;  $R = 1, 2$  – номер гармоніки;  $p$  – число полюсів електродвигуна;  $S$  – ковзання в електродвигуні.

Кінематичний ланцюг технологічної машини містить значну кількість підшипників кочення, які також є джерелами збурення, що викликаються різними похибками:

– відхилення форми підшипників кочення викликає збурення з частотою

$$f_{\Phi} = n_i / (2 \times 60), \quad (3)$$

де  $n_i$  – частота обертання вала, який встановлено на цьому підшипнику

– радіальні зазори в підшипниках кочення обумовлюють коливання з частотою

$$f_{\text{пк}} = z_T n_i / (2 \times 60), \quad (4)$$

де  $z_T$  – кількість тіл кочення в підшипнику

– хвилястість доріжок кочення також обумовлює коливання:

○ для внутрішніх доріжок

$$f_{\text{внутр}} = f_{\Phi} \times (1 - d_T/D_0) \times z_T \times z_B/q, \quad (5)$$

○ для зовнішніх доріжок

$$f_{\text{внутр}} = f_{\Phi} \times (1 + d_T/D_0) \times z_T \times z_B/q, \quad (6)$$

– похибки форми тіл кочення (гранність) також обумовлюють виникнення коливань

○ для внутрішніх доріжок

$$f_{\text{гр.внутр}} = f_p \times (D_0/d_T - d_T/D) \times z_T \times z_T/q, \quad (7)$$

○ для зовнішніх доріжок

$$f_{\text{гр.зовн}} = f_p \times (D_0/d_T + d_T/D) \times z_T \times z_T/q, \quad (8)$$

де  $D_0$  – діаметр кола центрів кульок;  $d_T$  – діаметр тіла кочення;  $z_B$  – кількість хвиль на доріжках кочення;  $z_T$  – кількість граней тіл кочення;  $q = 120/n$

– похибки виготовлення і складання деталей, що обертаються, викликають збурення з частотою

$$f_p = n_i / 60, \quad (9)$$

де  $n_i$  – частота обертання даної кінематичної ланки.

Можливо найбільш потужними є збурення, викликані специфікою роботи та похибками зубчастих передач. При роботі верстата наявні удари в зубчастих передачах, що відбуваються при переспряженні зубців та викликають коливання на частотах:

$$f_{\text{пз}} = n_i \times z_j / 60, \quad (10)$$

де  $z_j$  – число зубців зубчастого колеса.

Наступним кроком у підготовці до аналізу результатів діагностики (тобто зроблених записів віброакустичної активності верстата) повинен бути розрахунок частот коливань, що генеруються елементами кінематики верстата.

**Викладення основного матеріалу.** Об'єктом для дослідження обрано універсальний токарно-гвинторізний верстат 1К62. Частина кінематичної схеми верстата, а саме коробка швидкостей, яка зосереджує основні джерела коливань, подана на рис. 1.

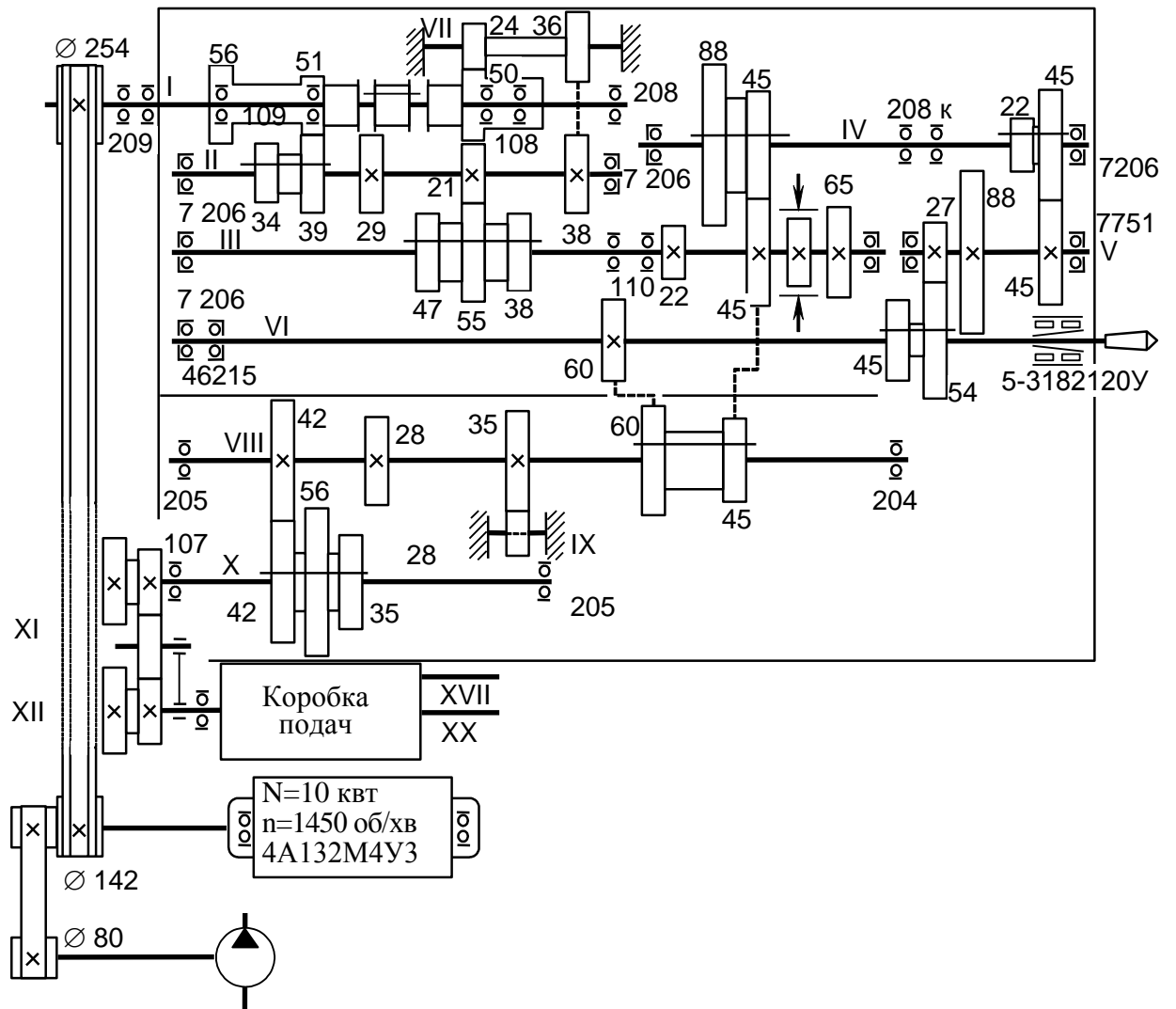


Рис. 1. Кінематична схема токарно-гвинторізного верстата мод. 1К62 для визначення частот, що генеруються можливими джерелами підвищених вібрацій

Зробивши запис віброакустичної активності верстата, наприклад з допомогою приладу ИШВ [измеритель шума и вибрации (рос.)], можна здійснити спектральний аналіз одержаного сигналу.

Спектрограма, зроблена з використанням комплекту обладнання фірми „Bruel & Kjaer“ (Данія), має вигляд (рис. 2):

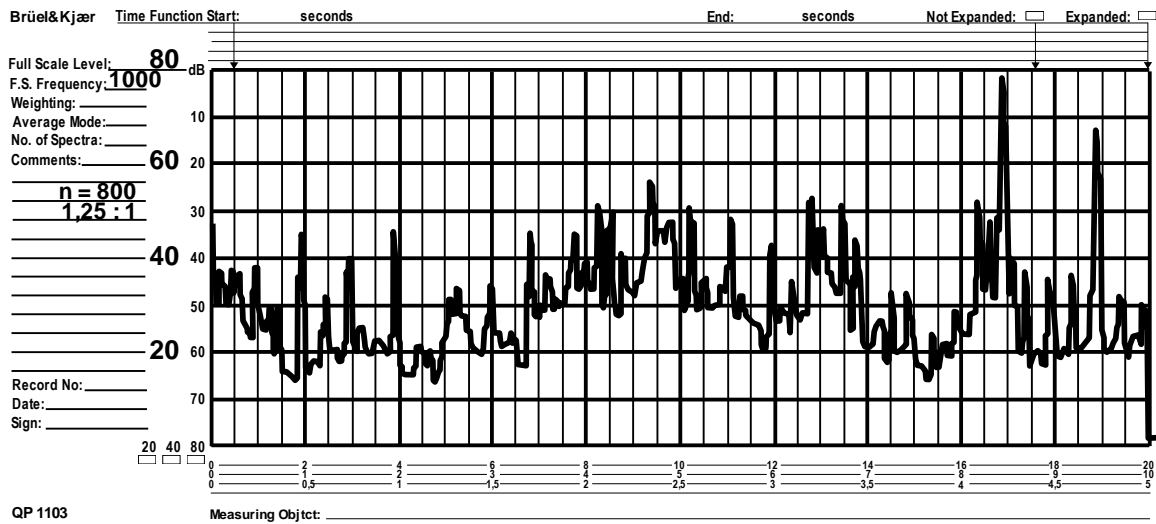


Рис.2. Зразок спектрограми, одержаної з використанням обладнання фірми „Brüel & Kjaer“

Спектрограма, побудована програмою аналізатором спектра за записом сигналу віброакустичної активності, може мати вигляд як на рис. 3.

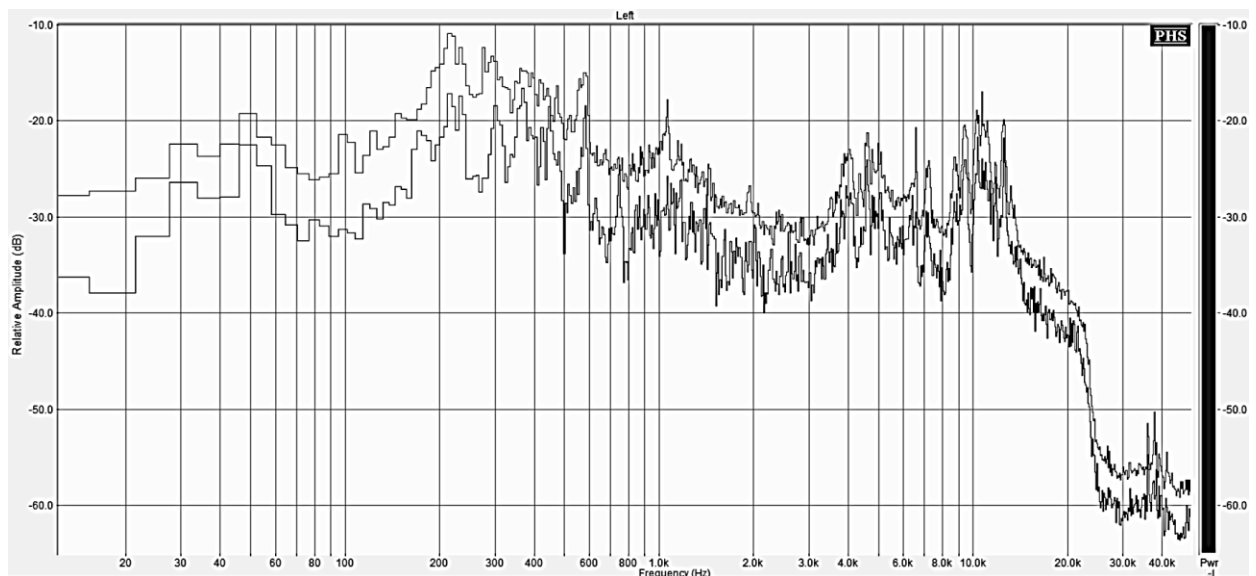


Рис.3. Спектрограма, одержана з використанням програми аналізатора спектра (частотний діапазон, доступний у програмі).

Номінальний діапазон приладу ИШВ – 20...12000 Гц, відповідно до цього на спектрограмі спостерігається різкий спад рівнів, що відображуються на графіку. Добре розрізняються окремі частоти приблизно на половині спектрограми при логарифмічній шкалі частот.

Більш точний аналіз може здійснюватися при розгляді спектру частинами. Такий аналіз потребує поділу спектру на десять частин або більше. На рис. 4 наведені деякі часткові спектра вибірково. Також передбачена можливість „трасування“ тобто визначення значення частоти і рівня сигналу для обраних точок спектрограми.

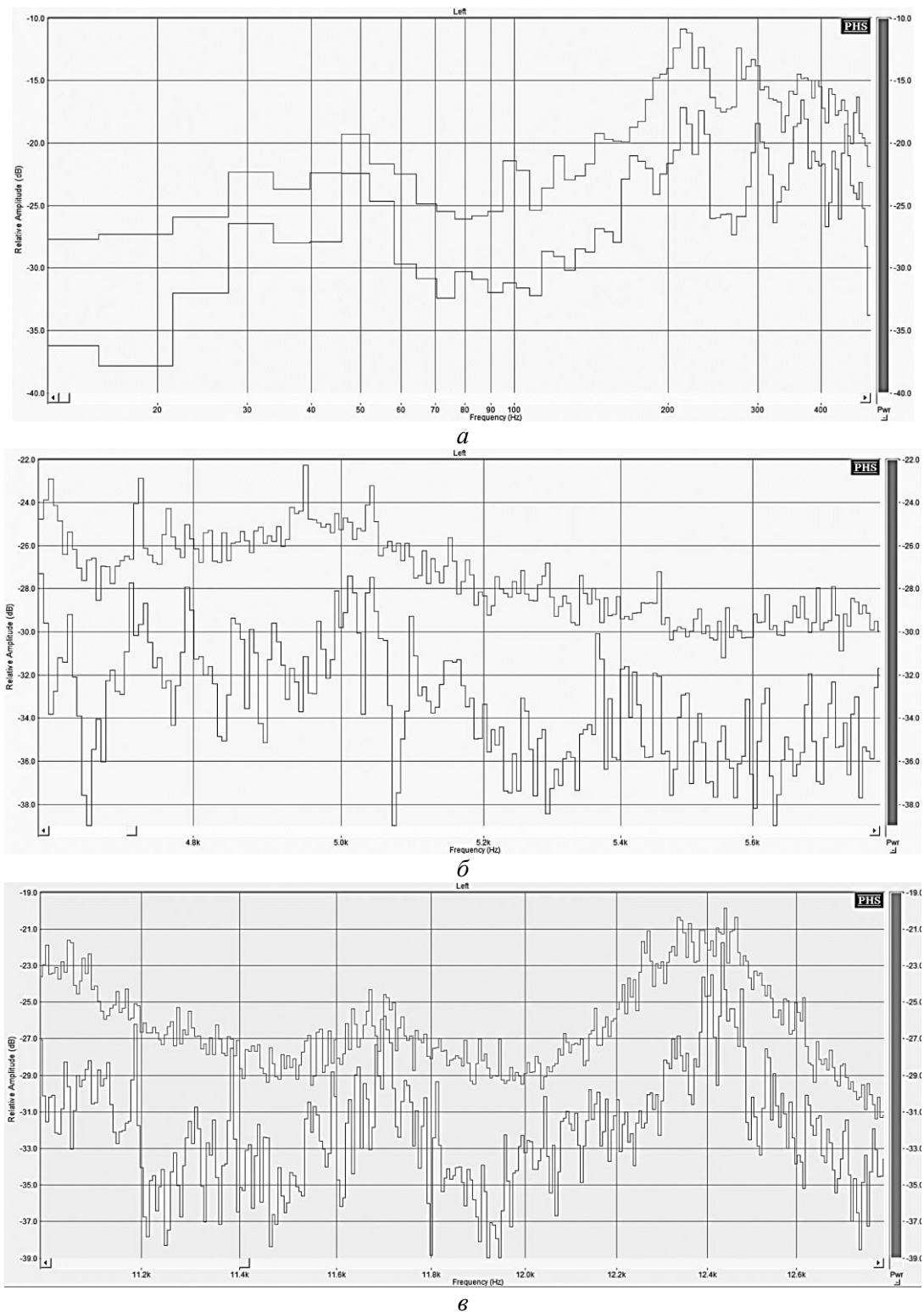


Рис.4. Приклад спектрограми віброакустичної активності верстака 1К62:  
 а – частоти 12...500 Гц; б – частоти 4,7...5,8 кГц; в – частоти 11,0...12,8 кГц.

Слід особливо відзначити, що побудова спектру здійснюється за миттєвими спектрами, які визначаються з інтервалом  $\sim 0,02$  с.

На спектрограмі відображено сумарний графік усіх миттєвих спектрів (верхня крива) та останній миттєвий спектр. Сумарний спектр помітно згладжений. На миттєвому спектрі частоти з підвищеною потужністю виділяються чіткіше, а під час побудови спектру (відтворенні запису віброакустичної активності) піки на миттєвому спектрі весь час змінюють своє положення (рис. 5).

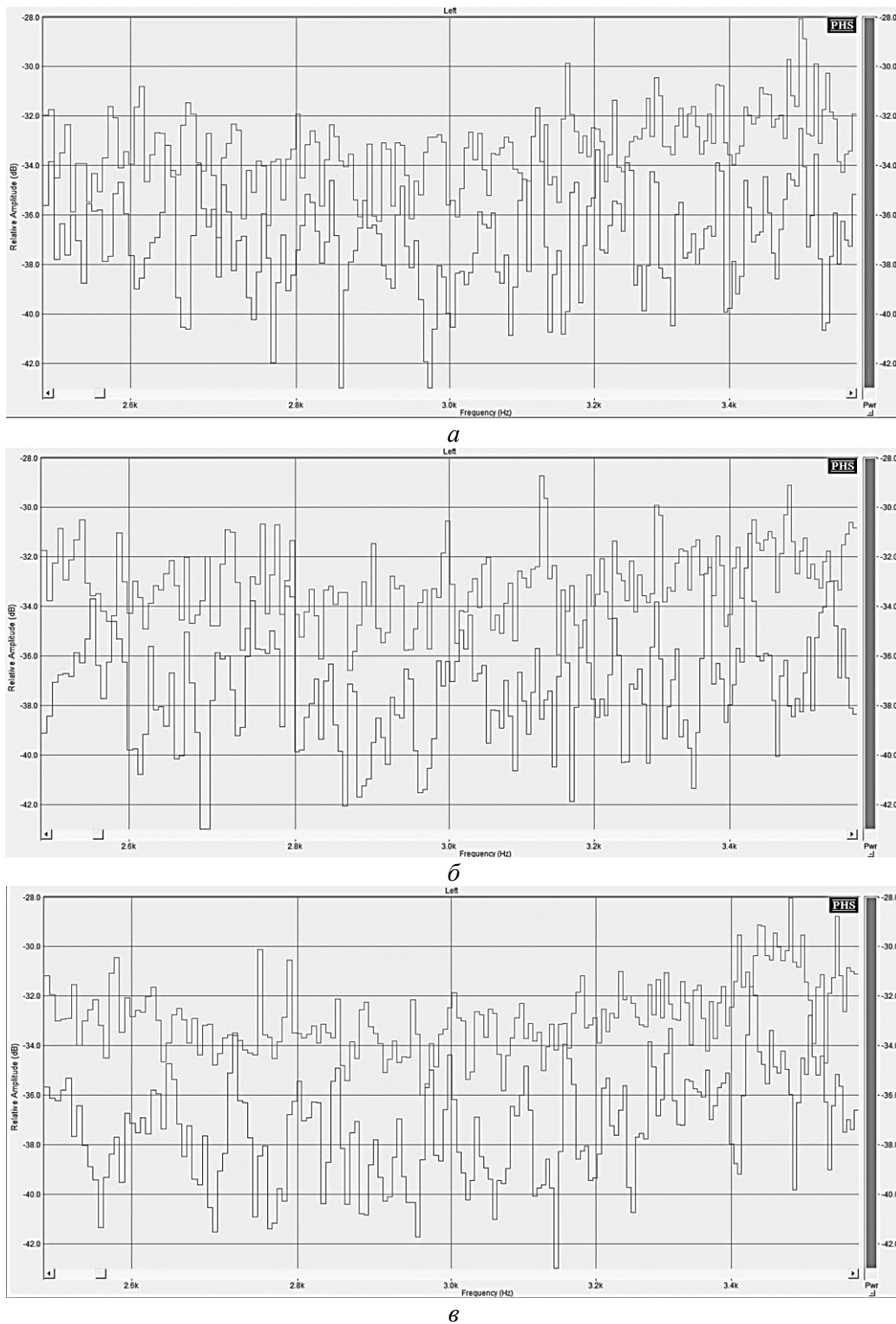


Рис.5. Зразки миттєвих спектрів для одного з діапазонів при випадково здійснених зупинках

Така особливість процесу обумовлена тим, що під час роботи досліджуваної машини безперервно змінюється відносне положення ланок кінематичного ланцюга і проявляються дефекти, розташовані в різних частинах деталей, наприклад один зношений чи пошкоджений зубець зубчастого колеса генерує сигнал при певному положенні колеса один раз за повний оберт. Таким чином порівняння миттєвих спектрів напевне дасть додаткову інформацію стосовно стану машини.

Отже аналізуючи „вібраційні портрети“ верстата (машини) можна визначити, які деталі генерують вібрації із зростаючим рівнем тобто виявити деталі, які потребують першочергової

перевірки їх стану і, можливо вже потребують ремонту (відновлення) або заміни новими деталями, запобігаючи цим виникнення аварійних відмов обладнання.

### Інформаційні джерела

1. Исследование виброакустических характеристик токарно-винторезных станков / В.Б. Струтинский, А.В. Шевченко, А.В. Даниленко, Али Джаалук / Вестник НТУУ „КПИ“. Машиностроение. К.: НТУУ „КПИ“ 1999 – вып.34, с. 112-121.

2. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем: учебное пособие. Часть 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 128 с.

3. Даниленко О.В., Яхно А.С. Дослідження віброакустичних характеристик металорізальних верстатів / Materiály XII mezinárodní vědecko – praktická konference «Dny vědy – 2016». – Díl 19. Technické vědy.: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 72 stran. (с. 31-36).

**Даниленко А.В., Верба И.И., Самойленко А.В.**

### **ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБОРУДОВАНИЯ КАК ПРЕДПОСЫЛКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

***Аннотация.** Увеличение в промышленности процента мелких предприятий обуславливает усложнение организации поддержания оборудования в рабочем состоянии. Одним из возможных путей решения этой проблемы является постоянный мониторинг состояния оборудования. Достаточно простым и в то же время информативным является анализ виброакустической активности машин. Периодическое создание „вибрационных портретов“ машины позволяет, сравнивая их, определить тенденции в изменении состояния звеньев кинематической цепи. Увеличение скорости возрастания интенсивности вибраций, генерируемых отдельными составляющими машины, является основанием для проверки таких деталей и исключения аварийных остановок (поломок) машин.*

**Ключевые слова:** диагностика состояния оборудования, „вибрационный портрет“ машины, расчет частот колебаний, спектральный анализ, идентификация источников колебаний.

**Danylenko O., Verba I., Samoilenko O.**

### **DIAGNOSTIC MONITORING OF EQUIPMENT AS A PREREQUISITE OF PROVIDING ITS ABILITY TO WORK**

***Summary.** The increase in the share of small businesses in the industry makes it difficult to organize the maintenance of equipment in working order. One of the possible ways to solve this problem is to constantly monitor the condition of the equipment. Simple and informative is the analysis of the vibroacoustic activity of the machines. The periodic creation of „vibration portraits“ of the machine allows them to compare trends in changes in the state of the links of the kinematic chain. Increasing the rate of increase in the intensity of vibrations generated by certain components of the machine is the basis for checking such details and eliminating the emergency stops (breakdowns) of the machines.*

**Keywords:** equipment condition diagnostics, “vibration portrait” of the machine, calculation of vibration frequencies, spectral analysis, identification of vibration sources.



УДК 621.9.048

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-5>

Денисюк В.Ю., к.т.н., Симолюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Карманський М.В., Ніщот Р.В.

Луцький національний технічний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ДЕТАЛІ І ГРАНУЛ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВІБРОБУНКЕРА

*В статті розглянуто результати досліджень високочастотних хаотичних вібраційних переміщень елементів робочого середовища (гранул абразиву). Встановлено, що 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. Кореляційна функція і спектральна щільність випадкових значень швидкості взаємних переміщень деталей і гранул відповідає сумі процесів з обмеженим спектром і постійними значеннями спектральній щільності. Інтенсивність імпульсних навантажень на деталь змінюється по площі вібробункера. Ділянка підвищеної інтенсивності навантажень зосереджена в місцях взаємодії вібробункера з упором. При включенні трьох електромагнітів наявні три ділянки підвищеної інтенсивності з максимально можливими ударними навантаженнями. Тому одночасне включення трьох магнітів забезпечує найбільшу продуктивність обробки.*

**Ключові слова:** вібраційна обробка, вібробункер, гранула, абразив, циркуляційний рух, траєкторія, імпульс, навантаження, електромагніт.

**Постановка проблеми.** 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.

Саме до технологічних факторів процесу відносяться: продуктивність при заданій якості, вибір абразивних матеріалів і режимів обробки, необхідність застосування хімічних добавок в робочі розчини або нагрівання їх з метою підвищення ефективності обробки [1].

Практика показує, що на результати процесу впливають декілька десятків різних факторів, з яких необхідно вибрати оптимальне співвідношення. Складність цієї роботи вимагає проведення відповідних досліджень для кожного випадку переведення обробки деталей на вібраційні методи обробки, особливо якщо за технічними вимогами необхідне використання вібраційного шліфування і полірування [2, 3, 4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В залежності від призначення технологічної операції можуть застосовуватись абразивні й інші неметалічні матеріали з різними характеристиками, а також металічні середовища з робочими тілами відповідної форми і розмірів. Інтенсивність вібраційної обробки залежить від режимів і часу обробки, характеристики і розмірів частинок робочого середовища, механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей та ін. 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 [5, 6, 7].

Динамічний вплив робочого середовища залежить від глибини занурення, відстані від стінок робочої камери, режимів вібрації, розмірів і питомої ваги частинок робочого середовища. Він зростає із збільшенням амплітуди та частоти коливань, глибини занурення, розмірів і питомої ваги частинок робочого середовища, а також від наближеності оброблюваних деталей до стінок робочої камери. Орієнтація оброблюваних деталей безперервно змінюється в процесі обробки деталей. Вільно завантажені деталі рухаються в потоці робочого середовища з деяким відставанням, в порівнянні з частинками наповнювача. В процесі обробки, деталі стараються розміститись по периферії циркулюючого робочого середовища [5, 7].

Формування поверхневого шару в процесі вібраційної обробки відбувається під дією багаторазових мікроударів частинок робочого середовища, які викликають утворення слідів обробки, зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару (шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень і структури). Форма і розміри слідів обробки визначаються параметрами робочого середовища, режимами обробки, властивостями оброблюваного матеріалу.

Послання таких елементів процесу як послідовне нанесення великої кількості мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища і оброблюваних деталей при їх різній швидкості перемішування і взаємній орієнтації, супроводжується (в залежності від характеристики робочого середовища і режимів вібрування) зніманням металу і його окислів, поверхневим пластичним деформуванням, і створює умови для виконання очисних, викінчувальних, шліфувальних і інших операцій [6].

**Мета роботи.** Встановлення основних закономірностей повільного циркуляційного руху робочого середовища та визначення процесу взаємодії деталі і гранул при ударному навантаженні вібробункера.

**Викладення основного матеріалу.** 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 [3].

Розглянуті закономірності повільного та вібраційного руху забезпечують рівномірність обробки. Вони є аналогами руху подачі при традиційній лезовій обробці. Процеси обробки деталей забезпечуються віброімпульсними процесами взаємодії поверхні деталі та гранул абразиву.

Обробка поверхні забезпечується рухом деталі при ударі дна вібробункера по упору. Густина деталі набагато більша густини абразиву, тому при ударі деталь буде рухатись за інерцією відносно сусідніх гранул абразиву (рис. 1).

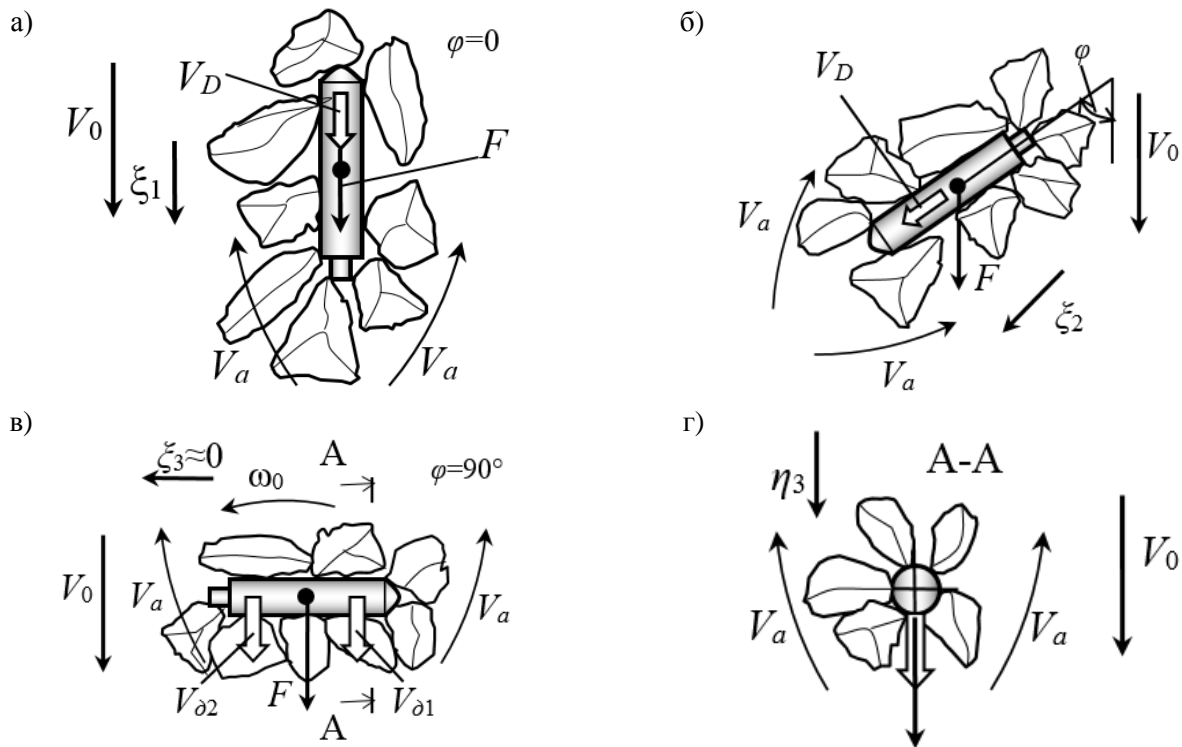


Рис. 1. Взаємне зміщення деталі та гранул абразиву при ударному навантаженні на вібробункер

Якщо напрям швидкості  $V_a$  співпадає із віссю деталі (рис. 1, а), то вона буде переміщуватись на більшу відстань  $\xi_1$ . При розташуванні деталі під кутом (рис. 1, б), її переміщення  $\xi_2$  буде меншим ніж  $\xi_1$ . Відповідно буде менш ефективним процес знімання металу з поверхні деталі. Найменші переміщення деталі мають місце у випадку, коли її вісь перпендикулярна напрямку швидкості  $V_0$ .

При цьому осьове переміщення деталі  $\xi_3$  практично відсутнє. Має місце зміщення деталі в напрямку  $\eta_3$ . Але це зміщення є незначним по причині великого опору. Тому його вплив на ефективність обробки є несуттєвим. Положення деталі в просторі є випадковим і змінюється в процесі руху робочого середовища. Для характеристики випадкового положення деталі використано випадкову величину (кут  $\varphi$ ). Кут  $\varphi$  змінюється в межах  $\pm 90^\circ$ . При цьому, процес обробки є найбільш ефективним при  $\varphi=0$ . Для випадкового положення деталі складена динамічна модель її руху відносно гранул абразиву.

Динамічна модель руху деталі подана у вигляді одномасової системи, напрям переміщення якої (кут  $\varphi$ ) є випадковим (рис. 2).

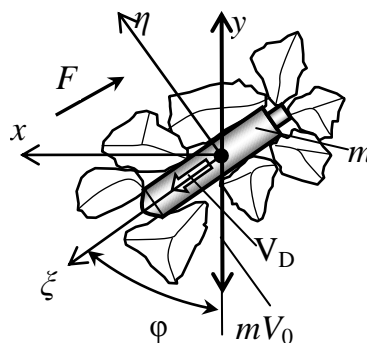


Рис. 2. Розрахункова схема робочого переміщення деталі відносно абразиву при ударі вібробункера

Відповідно розрахункової схеми складено диференціальне рівняння переміщення деталі:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + b \frac{d\xi}{dt} = 0, \quad (1)$$

де  $m$  – маса деталі, яка зміщується на величину  $\xi$ ,  $b$  – коефіцієнт опору переміщення деталі, що залежить від випадкового значення кута  $\varphi$ ;  $t$  – час.

Коефіцієнт опору залежить від нормальної сили взаємодії деталі і гранули абразиву. Нормальна сила визначається гравітаційною силою  $mg$  ( $g$  – прискорення вільного падіння) та кута її дії.

При вертикальному положенні деталі ( $\varphi=0$ ) гравітаційна сила не впливає на нормальне навантаження. При куті  $\varphi=\pi/2$  нормальне навантаження є максимальним. Тому для аналітичного визначення коефіцієнта опору запропонована залежність:

$$b = b_0 + c_b \cdot mg \sin \varphi, \quad (2)$$

де  $b_0$  – постійне значення коефіцієнта опору, яке не залежить від маси деталі, а визначається лише її стисненням гранулами абразиву;  $c_b$  – середній коефіцієнт сухого тертя деталі і абразиву.

Початковими умовами для рівняння (1) є наступні: при  $t=0$ ,  $\xi=0$ ,

$$\frac{d\xi}{dt} = V_0 \cos \varphi \quad (3)$$

Проведено однократне інтегрування рівняння (1) і одержано:

$$m \frac{d\xi}{dt} + b\xi = C_1 \quad (4)$$

де  $C_1$  – константа інтегрування. Вона знаходиться із початкових умов. Підставивши початкові умови (3) в залежність (4), одержимо:

$$C_1 = mV_0 \cos \varphi.$$

Перетворимо рівняння (4) до виду:

$$\frac{m \cdot d\xi}{(-mV_0 \cos \varphi + b\xi)} = -dt.$$

Проінтегруємо дане рівняння в межах від  $t=0$ ,  $\xi=0$  до  $t$ ,  $\xi$ :

$$\frac{m}{b} \int_0^\xi \frac{d\xi}{\left(\xi - \frac{mV_0 \cos \varphi}{b}\right)} = - \int_0^t dt.$$

Обчисливши даний інтеграл остаточно одержимо розв'язок рівняння:

$$\ln \left| \xi - \frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \right| - \ln \left| - \frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \right| = - \frac{b}{m} t.$$

Після потенціювання одержаного співвідношення одержимо:

$$\xi = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \left( 1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right). \quad (5)$$

Підставимо в залежність (5) значення коефіцієнта опору (3) і одержимо розрахункове переміщення деталі під дією ударного імпульсу:

$$\xi = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b_0 + c_b mg \sin \varphi} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{b_0 + c_b mg \sin \varphi}{m}\right)t} \right]. \quad (6)$$

Максимальне переміщення має місце в кінці процесу (при  $t \rightarrow \infty$ ). Підставивши значення  $t$  в формулу (6), одержимо:

$$\xi_{\max} = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b_0 + c_b mg \sin \varphi}.$$

Переміщення деталі відносно гранули абразиву проходить під час удару і є основним чинником процесу обробки. Інтенсивність обробки поверхні визначається швидкістю різання. В даному випадку, швидкістю різання  $V_D$  є швидкість взаємного зміщення деталі і гранули абразиву, яка направлена на осі деталі. Швидкість  $V_D$  буде визначена диференціюванням залежності (6) і складає:

$$V_D = \frac{d\xi}{dt} = V_0 \cos \varphi e^{-\left(\frac{b_0 + c_b g \sin \varphi}{m}\right)t}. \quad (7)$$

Швидкість різання змінюється в часі від максимального значення до нуля. Максимальна швидкість має місце при  $t=0$ . Вона визначається із залежності (7):

$$V_{\max} = \left. \frac{d\xi}{dt} \right|_{\max} = V_0 \cos \varphi.$$

В результаті наведеного розрахунку можна зробити висновок, що переміщення і швидкість руху деталі змінюються в часі по аперіодичному закону (рис. 3).

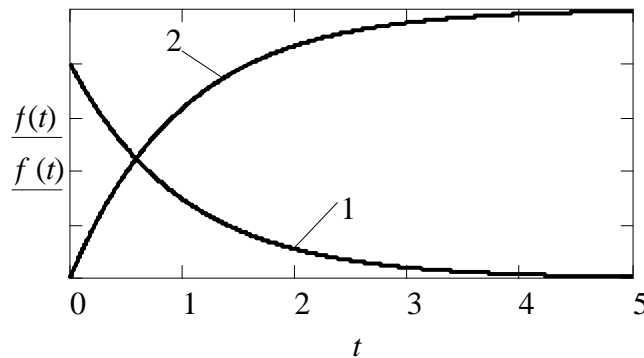


Рис. 3. Робоче переміщення деталі відносно гранул (крива 1) та швидкість взаємного переміщення деталі і гранули (крива 2)

Із аналізу графіків випливає, що процес обробки в основному забезпечується в проміжок часу  $t=0 \dots t_0$ .

Положення деталі в робочому середовищі є невизначеним. Воно визначається випадковим кутом  $\varphi$ . Швидкість різання характеризується максимальним значенням  $V_0 \cos \varphi$ , де,  $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ . Зміни максимальної швидкості по куту обумовлюють різний ступінь ефективності обробки деталі в залежності від її кутового положення. Найбільш ефективний процес різання при вертикальному розташуванні деталі  $\varphi \approx 0$ . При кутах  $|\varphi| \approx \frac{\pi}{2}$  процес обробки є малоефективним.

Швидкість різання як випадкова величина має певні статистичні характеристики. Основними з них є кореляційна функція та спектральна щільність. Вони знайдені шляхом статистичної обробки.

Рух деталі після дії імпульсного навантаження визначиться формулою (7), яка подана у вигляді:

$$V_K = \frac{1}{T} Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}, \quad (8)$$

$$\text{де, } Q_K = \frac{V_0 \cos \varphi}{\left(\frac{b_0}{m} + c_b g \sin \varphi\right)}, T = \frac{1}{\left(\frac{b_0}{m} + c_b g \sin \varphi\right)}.$$

Імпульсні навантаження на деталь діють періодично з частотою  $f_z$  і викликають сумарну зміну швидкості, яку можна визначити користуючись принципом суперпозиції. Відповідно значення швидкості в момент часу  $t$  складає:

$$V(t) = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t} Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}, \quad (9)$$

де сума береться для всіх значень  $t \geq T_k$ .

Залежність (9) визначає зміну швидкості деталі під дією імпульсних навантажень, які відбуваються лише в одній точці. Зміна швидкості в часі представляє собою випадковий процес.

Загальна швидкість елемента відповідає суперпозиції збурень швидкості від кожного ударного імпульсу і визначається сумою:

$$V_{\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^M V_j(t),$$

де  $M$  – загальне число ударних імпульсів.

Реалізація випадкової зміни сумарної швидкості відповідає сумі випадкових процесів. Визначимо окремо кожен випадковий процес і знайдемо його спектральні характеристики згідно з методикою [2].

Розглянемо проміжок часу  $(s, t)$ , причому  $s \rightarrow -\infty$ . Швидкість, яка спричинена імпульсними навантаженнями, що мають місце в проміжку часу  $(s, t)$ , позначимо  $V_s(t)$ . Прийmemo, що число ударів, що мало місце за даний проміжок часу, в середньому складало  $\mu$  ударів в одиницю часу. Удари є не частими подіями, тому величина  $\mu$  мала. Число ударів в одиницю часу  $\mu$  відповідає частоті імпульсів. Тому:

$$\mu \cong f_z.$$

Число ударів можна вважати розподіленим за законом Пуассона (закон не частих подій), причому математичне сподівання цього розподілу:

$$\lambda = \mu(t - s).$$

Визначимо випадкову подію  $e_m$ , яка відповідає числу ударів  $m = 0, 1, 2, \dots$  за проміжок часу  $(s, t)$ . Ймовірність цієї події:

$$P(e_m) = \frac{\lambda^m \cdot e^{-\lambda}}{m!}, m = 0, 1, 2, \dots$$

Для проміжку часу  $(s, t)$  при кількості ударів  $m$  швидкість деталі визначається залежністю:

$$V_s(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}. \quad (10)$$

Дана залежність є основою для розрахунків випадкового процесу зміни швидкості деталі в процесі її ударно-імпульсної обробки.

Визначені спектральні характеристики випадкового процесу флуктуації швидкості деталі. Для цього виконано аналіз залежності (10). Розглянемо всі можливі випадки наявності кількох ударів на деталь в одиницю часу ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ).

Знайдемо математичне сподівання випадкової функції  $V_s(t)$ :

$$M[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} P(e_m) M[V_s(t) | e_m], \quad (11)$$

де,  $M[V_s(t) | e_m]$  – умовне математичне сподівання випадкової функції  $V_s(t)$  за умови здійснення події  $e_m$ .

Умовне математичне сподівання розраховується на основі формули (9) шляхом знаходження статистичного середнього по всіх можливих значеннях інтенсивності ударів  $Q_K$  та

всіх можливих моментах ударів  $T_k$  при фіксованому числі ударів, що діють в інтервалі часу ( $s, t$ ).

Враховуючи незалежність випадкових величин  $Q_k$  і  $T_k$ , одержимо:

$$M[V_s(t) | e_m] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m M \left[ Q_k \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m M[Q_k] \cdot M \left[ e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right]. \quad (12)$$

Математичне сподівання експоненціальної функції:

$$M \left[ e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \int_s^t e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} \cdot P_{TK}(\tau) d\tau,$$

де,  $P_{TK}(\tau)$  – щільність ймовірності випадкової величини  $T_k$ .

Цю щільність ймовірності прийемо постійною  $P_{TK}(\tau) = 1/(t-s)$ , оскільки моменти ударів розподілені в проміжку часу ( $s, t$ ) рівномірно.

Таким чином, математичне сподівання експоненціальної функції:

$$M \left[ e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \frac{1}{t-s} \int_s^t e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} d\tau = \frac{T}{t-s} \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (13)$$

Позначивши математичне сподівання інтенсивності удару  $M[Q_k] = q$ , одержимо:

$$M[V_s(t) | e_m] = \sum_{k=1}^m \frac{q}{t-s} \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right) = \frac{mq}{t-s} \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (14)$$

Використовуючи значення (14), знайдемо з (11) математичне сподівання випадкової функції  $V_s(t)$ :

$$M[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^m \cdot e^{-\mu(t-s)}}{m! \cdot (t-s)} mq \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right).$$

Після перетворення даної залежності одержимо:

$$M[V_s(t)] = \mu q e^{-\mu(t-s)} \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^{m-1}}{(m-1)!}.$$

Враховуючи, що експоненціальна функція відповідає ряду:

$$e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!},$$

одержимо, підставивши замість  $z = \mu(t-s)$ :

$$e^{\mu(t-s)} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^{m-1}}{(m-1)!}.$$

Таким чином, математичне сподівання швидкості деталі, яку вона набуває внаслідок ударів, складе:

$$M[V_s(t)] = \mu q \left( 1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (15)$$

В граничному випадку  $s \rightarrow -\infty$  значення математичного сподівання швидкості деталі визначається залежністю:

$$M[V_s(t)] = \mu q. \quad (16)$$

Знайдемо кореляційну функцію швидкості деталі. Для цього розглянемо значення величин у два моменти часу  $t$  і  $t'$ . Для  $t' > t$  із формули (9) одержимо:

$$V(t') = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (17)$$

Сума в правій частині (17) може бути розділена на дві складові. Відповідно знайдемо:

$$V(t') = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}} + \frac{1}{T} \sum_{t \leq T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (18)$$

З формули (18), враховуючи (9), випливає:

$$V(t') = V(t) \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}} + \frac{1}{T} \sum_{t \leq T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (19)$$

Другий доданок в (19) не залежить від  $V(t)$ , тому що він включає інші випадкові величини. Тому кореляційна функція дорівнює кореляційному моменту величин:

$$V(t) e^{-\frac{t'-t}{T}} \quad \text{та} \quad V(t).$$

Відповідно значення кореляційної функції флуктуацій швидкості деталі складе:

$$R_{\omega}(t, t') = D[V(t)] \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}}. \quad (20)$$

Знайдемо дисперсію швидкості  $D[V(t)]$ . Дисперсія (умовна) випадкової функції  $V_s(t)$  за умови, що на деталь діє  $m$  ударів за час  $(s, t)$ , дорівнює сумі дисперсій доданків у формулі (20) (внаслідок незалежності доданків). Знайдемо дисперсію одного доданку. Його центральний момент другого порядку:

$$M\{[V_s(t)]^2\} = M\left[Q_k^2 e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right] = M[Q_k^2] \cdot M\left[e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right]. \quad (21)$$

Математичне сподівання інтенсивності ударів  $Q_k$  дорівнює  $q$ . Дисперсію інтенсивності ударів позначимо  $D$ . Тоді

$$M[Q^2 K] = q_2 + D. \quad (22)$$

Математичне сподівання експоненціальної функції  $e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}$  знайдемо за формулами (12) та (13), в яких замість  $T \rightarrow T/2$ .

Відповідно, значення математичного сподівання експоненціальної функції:

$$M\left[e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right] = \frac{T}{2(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right). \quad (23)$$

В результаті одержимо умовну дисперсію швидкості деталі  $V_s(t)$  за умови, що за час  $(s, t)$  на деталь діє  $m$  ударів:

$$D[V_s(t) | e_m] = \frac{m(q^2 + D)}{2T(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{mq^2}{(t-s)^2} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2. \quad (24)$$

Дисперсія випадкової кутової швидкості:

$$D[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} D[V_s(t) | e_m] \cdot P(e_m).$$

Після підстановки значень величин із (24) одержимо:

$$D[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{m(q^2 + D)}{2T(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{mq^2}{(t-s)^2} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2 \right] \cdot \frac{[\mu(t-s)]^m \cdot e^{-\mu(t-s)}}{m!}.$$

Після спрощення, відповідно до формул (14) та (15), знайдемо:

$$D[V_s(t)] = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{\mu q^2}{t-s} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2. \quad (25)$$

В граничному випадку  $s \rightarrow -\infty$  значення дисперсії швидкості деталі визначається залежністю:

$$D[V(t)] = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T}. \quad (26)$$

Використовуючи значення дисперсії, одержимо кореляційну функцію швидкості деталі, відповідно при дії ударних імпульсів лише в одній точці у вигляді:

$$R_V(t, t') = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}}. \quad (27)$$

Якщо  $t' < t$ , то відповідно в степені експоненти зміниться порядок доданків і тому для всіх значень  $t'$  і  $t$  будемо мати:



$$R_V(t, t') = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \cdot e^{-\frac{|t-t'|}{T}}, \quad (28)$$

де  $\mu$  – число імпульсних навантажень на деталь в одиницю часу (частота навантажень);  
 $q$  – математичне сподівання інтенсивності ударних імпульсів;  
 $D$  – дисперсія інтенсивності імпульсів, що діють на деталь;  
 $T$  – постійна часу.

Всі ці параметри залежать від місця дії імпульсного навантаження на деталь.

Швидкість деталі є сумою випадкових змін швидкості, обумовлених ударами в різних точках.

Будемо вважати зміни швидкості, що мають місце під дією імпульсних навантажень у різних точках некорельованими. При цьому кореляційна функція буде визначатися наступною формулою:

$$R_\Sigma(t, t') = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2T_\xi} \cdot e^{-\frac{|t-t'|}{T_\xi}}, \quad (29)$$

де,  $Z$  – число точок, в яких діють ударні навантаження;

$\mu_\xi$  – частота навантажень в  $\xi$ -ій точці;

$q_\xi, D_\xi$  – математичне сподівання та дисперсія інтенсивності імпульсів;

$T_\xi$  – постійна часу, визначена для деталі, на  $\xi$ -ту точку якої діє ударне навантаження.

Формула (29) дозволяє визначити кореляційну функцію випадкових флуктуацій швидкості деталі. Із аналізу кореляційної функції швидкості деталі випливає, що вона залежить лише від різниці:

$$\tau = t - t',$$

тобто відповідає стаціонарному випадковому процесу. Тому кореляційна функція подана у вигляді:

$$R_V(\tau) = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2T_\xi} \cdot e^{-\frac{|\tau|}{T_\xi}}. \quad (30)$$

Даній кореляційній функції відповідає спектральна щільність випадкового процесу зміни швидкості руху деталі:

$$S_V(\omega) = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2} \cdot \frac{1}{(1 + T_\xi^2 \omega^2)}, \quad (31)$$

Таким чином, встановлено, що кореляційна функція випадкових змін швидкості деталі внаслідок ударних навантажень є набором (сумою) експоненціальних функцій, а спектральна щільність випадкового процесу зміни швидкості являє собою суму дробово-раціональних функцій від квадрата частоти. Дані статистичні характеристики дають можливість встановити частотний діапазон випадкових змін швидкості деталі та дисперсію швидкості деталі, яку вона набуває внаслідок дії ударних навантажень.

Розрахунок статистичних характеристик, відповідних формулам (30) і (31) дає можливість встановити основні параметри випадкового процесу зміни швидкості деталі під дією ударно-імпульсних навантажень (рис. 4).

Статистичні характеристики процесу зміни швидкості є основою для знаходження дисперсії швидкості деталі, яку вона набуває під час ударно-імпульсних навантажень.

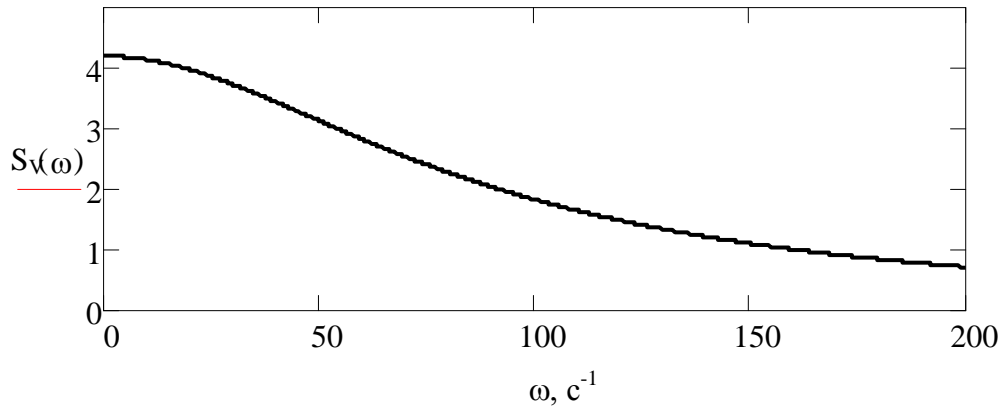


Рис. 4. Статистичні характеристики випадкових змін швидкості деталі, яку вона набуває під дією ударно-імпульсних навантажень

Інтенсивність імпульсних навантажень змінюється по площі вібробункера. Для областей вібробункера, близьких до розташування електромагнітів, інтенсивність ударних навантажень зростає, а в інших областях падає. Проведено розрахунки дисперсії швидкості деталей для різних ділянок вібробункера при вмиканні кількох електромагнітів. При вмиканні чотирьох електромагнітів має місце чотири ділянки збільшення дисперсії швидкості деталей (рис. 5).

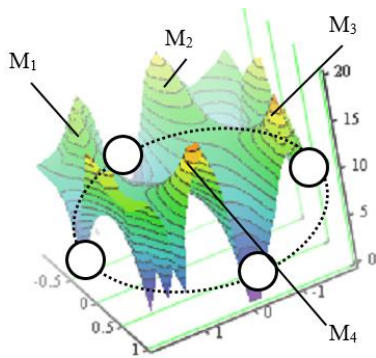


Рис. 5. Поле зміни дисперсії швидкості деталей, що спричинена ударно-імпульсними навантаженнями

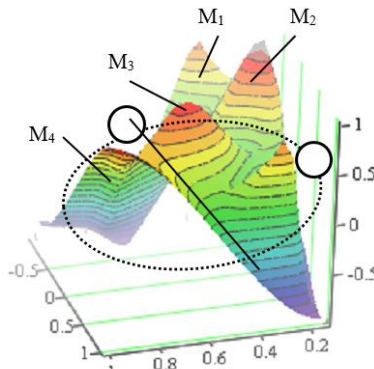


Рис. 6. Розподіл інтенсивності дисперсії швидкості деталей по площі вібробункера при його навантаженні двома магнітами

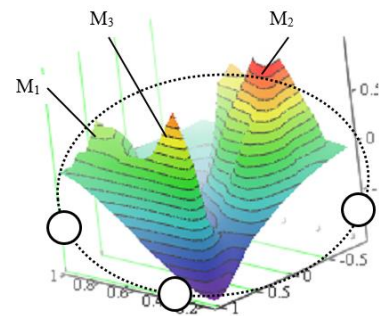


Рис. 7. Розподіл інтенсивності дисперсій при включенні трьох електромагнітів

На рис. 6 пунктирним колом показано периметр вібробункера та розташування чотирьох магнітів по його периферії. Із аналізу розподілу інтенсивності дисперсії випливає наявність чотирьох ділянок підвищеної інтенсивності швидкостей удару  $M_1$ - $M_4$ . Це значить, що використання одночасно працюючих чотирьох магнітів забезпечує значну рівномірність інтенсивності обробки деталей по площі вібробункера.

Використання двох магнітів для вібраційного навантаження вібробункера формує три максимуми інтенсивності дисперсій (рис. 6).

Два максимуми  $M_1$ ,  $M_2$  розташовані на периферії вібробункера між магнітами. Третій максимум дисперсії спостерігається в центрі вібробункера. Він обумовлений коливаннями дна, які стимулюють віброударні навантаження на деталь.

Включення трьох електромагнітів формує поле дисперсії із трьох максимумів. Вони розташовані в трьох радіальних напрямках, відповідних напрямкам розміщення електромагнітів, але зміщених відносно електромагнітів на кутову відстань близько  $30^\circ$  (рис. 7).

Інтенсивність максимумів змінюється. Як правило, один із максимумів перевищує два інші.

**Висновки.** 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.

Кореляційна функція і спектральна щільність випадкових значень швидкості взаємних переміщень деталей і гранул відповідає сумі процесів з обмеженим спектром і постійними значеннями спектральній щільності. Резонансні властивості мало проявляються у випадкових змінах середньої швидкості невеликих деталей і гранул.

Інтенсивність імпульсних навантажень на деталь змінюється по площі вібробункера. Ділянка підвищеної інтенсивності навантажень зосереджена в місцях взаємодії вібробункера з упором. При включенні трьох електромагнітів наявні три ділянки підвищеної інтенсивності з максимально можливими ударними навантаженнями. Тому одночасне включення трьох магнітів забезпечує найбільшу продуктивність обробки.

### Інформаційні джерела

1. Баби́чев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Баби́чев. – 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 Гадяк Жанна Володимирівна друкарня “Волиньполіграф”<sup>ТМ</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. Симонюк В.П. Дослідження високочастотних хаотичних вібраційних переміщень елементів робочого середовища вібробункера / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В. / «Перспективні технології та прилади». Збірник статей. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – С. 125–132.
7. 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.

Денисюк В.Ю., к.т.н., Симолюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С. к.т.н., Карманский М.В., Нищот Р.В.

Луцкий национальный технический университет

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛИ И ГРАНУЛ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ ВИБРОБУНКЕРА

*В статье рассмотрены результаты исследований высокочастотных хаотических вибрационных перемещений элементов рабочей среды (гранул абразива). Установлено, что в рабочей среде имеет место хаотическое движение отдельных элементов (гранул абразива), которое обусловлено ударными нагрузками на гранулу со стороны соседних гранул. Хаотическое движение проявляется в виде отклонений траектории движения отдельной гранулы от средней траектории циркуляционного движения. Отклонение траектории близится к гармоничному (синусоидальному) закону. Обработка детали в основном осуществляется при относительном перемещении детали относительно гранул абразива при ударе вибробункера. Скорость перемещения детали относительно гранул зависит от случайного положения детали относительно направления вектора скорости детали при ударе. Корреляционная функция и спектральная плотность случайных значений скорости взаимных перемещений деталей и гранул соответствует сумме процессов с ограниченным спектром и постоянными значениями спектральной плотности. Интенсивность импульсных нагрузок на деталь меняется по площади вибробункера. Участок повышенной интенсивности нагрузок сосредоточен в местах взаимодействия вибробункера с упором. При включении трех электромагнитов имеются три участка повышенной интенсивности с максимально возможными ударными нагрузками. Поэтому одновременное включение трех магнитов обеспечивает наибольшую производительность обработки.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, вибробункер, гранула, абразив, циркуляционное движение, траектория, импульс, нагрузка, электромагнит.*

V. Denysiuk, V. Symonyuk, Y. Lapchenko, M. Karmansky, R. Nishot  
Lutsk National Technical University

### MODELING THE DETAIL INTERACTION PROCESS AND PELLET AT SHOCK BUCKET LOAD

*The results of studies of high-frequency chaotic vibrational displacements of elements of the working medium (abrasive granules) are considered in the article. It is established that in the working environment there is a chaotic movement of individual elements (abrasive granules) which is caused by shock loads on the granule from the neighboring granules. The chaotic motion is manifested in the form of deviations of the trajectory of movement of a single pellet from the average trajectory of circulating motion. The deviation of the trajectory is close to the harmonic (sinusoidal) law. The machining of the workpiece is mainly carried out with the relative movement of the workpiece relative to the abrasive granules upon impact of the vibrating hopper. The speed of movement of the part relative to the pellets depends on the random position of the part relative to the direction of the velocity vector of the part at impact. The correlation function and the spectral density of random values of the speed of mutual movement of parts and granules corresponds to the sum of processes with a limited spectrum and constant values of the spectral density. The intensity of impulse loads per workpiece varies over the area of the vibrating hopper. The site of high intensity of loads is concentrated in the places of interaction of the vibrating hopper with emphasis. With the inclusion of three electromagnets there are three sections of high intensity with the maximum possible shock loads. Therefore, the simultaneous inclusion of three magnets provides the highest processing performance.*

**Keywords:** *vibration processing, vibration hopper, pellet, abrasive, circulatory motion, trajectory, momentum, load, electromagnet.*

УДК 543.08:665.3

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-6><sup>1</sup>І.П. Захаров, д.т.н., <sup>2</sup>Т.В. Чуніхіна, к.т.н., <sup>3</sup>В.Ю. Папченко, к.т.н.<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки<sup>2</sup> Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"<sup>3</sup> Український науково-дослідний інститут олій та жирів Національної академії аграрних наук України

## ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ДОСЛІДЖЕННЯХ НАСІННЯ СОНЯШНИКА НОВОЇ ЛІНІЇ

Олієжирова галузь є провідною галуззю харчової промисловості України. Зростаючий за останні роки об'єм виробництва соняшникової олії пояснюється зростанням врожаю та збільшенням вмісту олії у насінні соняшника. У роботі представлені результати дослідження фізико-хімічних показників якості соняшникового насіння нової лінії. Детально розглянуто процес дослідження одного із фізико-хімічних показників якості насіння соняшника-вмісту олії, із застосуванням методу екстракції. На прикладі одного із показників якості, вмісту олії у насінні соняшника, показано розрахунок невизначеності вимірювання цього показника.

**Ключові слова:** насіння соняшника, фізико-хімічні показники якості, метод екстракції, паралельні вимірювання, невизначеність вимірювання.

**Постановка проблеми.** Жири тваринного та рослинного походження займають четверту позицію серед груп товарів, які було експортовано Україною у 2018 році.

Україна є світовим лідером з виробництва та експорту соняшникової олії. За даними Державної служби статистики України, у січні-липні 2019 року в Україні було вироблено 3,25 млн. тон нерафінованої соняшникової олії, що на 17,3% перевищує аналогічний період 2018 року. Зростання об'ємів виробництва пояснюється зростанням урожаю та підвищенням вмісту олії у насінні соняшника.

Основні вимоги, що висуваються до соняшникової олії – це вимоги до показників якості та безпеки [1-7].

Ці показники визначаються у спеціалізованих фізико-хімічних лабораторіях, акредитованих на відповідність вимогам стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 [8]. Відповідно до вимог цього стандарту лабораторії повинні мати процедури оцінювання невизначеності вимірювань по кожному виду випробувань. Однак, ця вимога у більшості лабораторій не виконується у зв'язку зі специфікою фізико-хімічних випробувань.

В роботі [9] досліджені особливості оцінювання невизначеності паралельних вимірювань при виконанні кількісного хімічного аналізу. Оцінка невизначеності вимірювання показників якості та безпеки соняшникової олії була проведена у [10].

**Метою роботи** є аналіз процедури оцінювання невизначеності вимірювання вмісту олії у насінні соняшника як базового фізико-хімічного показника якості насіння соняшника.

### Дослідження фізико-хімічних показників якості насіння соняшника.

У рамках даної роботи були отримані результати досліджень п'яти фізико-хімічних показників якості насіння соняшника нової лінії X 114 В, розробленого Інститутом рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААНУ: вологість, 7,2 %; вміст олії у насінні у перерахунку на суху речовину, 40,61 %; об'ємна маса, 475,07 г; маса 100 одиниць насіння, 42, 95 г; масова частка оболонки у насінні, 32,7 %.

Показник якості насіння соняшника "вміст олії" визначався методом екстракції в апараті Сокслета [7].

Відповідно до [7] вміст олії у звільненому від сміття й підсушеному насінні у відсотках обчислюють за формулою:

$$X = \frac{(m - m_1)}{m_2} \cdot 100\% \quad (1)$$

де  $m$  – маса колби з олією, г;  $m_1$  – маса порожньої колби, г;  $m_2$  – наважка підсушеного насіння в екстракційному патроні, г.

Для розрахунку вмісту олії у насінні за формулою (1) було виконано п'ять паралельних вимірювань. Вихідні дані для розрахунку вмісту олії у насінні наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання маси при реалізації паралельних вимірювань

| Номер паралельного вимірювання | Результати вимірювання маси                          |
|--------------------------------|--|
| 1                              | $m=145,7984$ г<br>$m_1=143,4263$ г<br>$m_2=6,0612$ г |
| 2                              | $m=104,8702$ г<br>$m_1=102,4981$ г<br>$m_2=5,9901$ г |
| 3                              | $m=101,1455$ г<br>$m_1=98,7734$ г<br>$m_2=6,0205$ г  |
| 4                              | $m=115,6502$ г<br>$m_1=113,2781$ г<br>$m_2=6,0053$ г |
| 5                              | $m=130,1158$ г<br>$m_1=127,7437$ г<br>$m_2=6,0358$ г |

Отримані із використанням формули (1) результати вимірювання вмісту олії у насінні перераховуються на суху речовину за формулою [7]:

$$X^* = \frac{X \cdot 100\%}{100\% - W} \quad (2)$$

де  $X$  – вміст олії в зразку насіння, %;  $W$  – масова частка вологи у зразку подрібненого насіння, %.

Масова частка вологи в зразку насіння розраховується за формулою:

$$W = \frac{(m - m_1)}{(m - m_2)} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $m$  – маса бюкси з насінням до висушення, г;  $m_1$  – маса бюкси з насінням після висушення, г;  $m_2$  – маса порожньої бюкси, г.

Вихідні дані для розрахунку масової частки вологи при реалізації двох паралельних вимірювань наступні:  $m=15,8922$  г,  $m_1=15,7945$  г,  $m_2=12,5864$  г (перше вимірювання);  $m=15,3618$  г,  $m_1=15,2622$  г,  $m_2=12,0321$  г (друге вимірювання).

Отримані значення масової частки вологи у зразку насіння при реалізації двох паралельних вимірювань:  $W_1 = 2,955\%$ ,  $W_2 = 2,991\%$ .

Середньо-арифметичне значення масової частки вологи розраховувалося за формулою:

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{(m - m_1)}{(m - m_2)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де  $m$  – маса бюкси з насінням до висушення, г;  $m_1$  – маса бюкси з насінням після висушення, г;  $m_2$  – маса порожньої бюкси, г.

Середньо-арифметичне значення масової частки вологи у зразку насіння склало  $\bar{W} = 2,9734\%$ .

Розрахунок середньо-арифметичного значення вмісту олії у насінні було здійснено за наступною формулою:

$$\bar{X}^* = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{X_i \cdot 100\%}{100\% - \bar{W}}, \quad (5)$$

де  $X_i$  – вміст олії в зразку насіння, %;  $\bar{W}$  – середньо-арифметичне значення масової частки вологи у зразку подрібненого насіння, %.

Середньо-арифметичне значення вмісту олії у насінні склало  $\bar{X}^* = 40,607\%$ .

Результати вимірювання вмісту олії у насінні, розраховані із використанням формул (1) та (2), наведені у табл. 2.

Таблиця 2

| Результати вимірювання вмісту олії у насінні |                        |             |
|--|------------------------|-------------|
| Номер паралельного вимірювання               | Результати вимірювання |             |
|  | $X_i, \%$              | $X_i^*, \%$ |
| 1  | 39,2                   | 40,40       |
| 2  | 39,6                   | 40,81       |
| 3  | 39,4                   | 40,61       |
| 4  | 39,5                   | 40,71       |
| 5  | 39,3                   | 40,50       |

### Розрахунок невизначеності вимірювання вмісту олії у насінні соняшника.

Вимірювання досліджуваних параметрів проводилися у нормальних умовах, тобто додаткові похибки були відсутні.

Вимоги щодо умов вимірювання показників якості насіння соняшника наступні: температура повітря  $(20 \pm 5)^0 C$ ; атмосферний тиск від  $84,0 \times 10^3$  Па до  $106,7 \times 10^3$  Па; відносна вологість повітря (за температури  $25^0 C$ ) не повинна перевищувати 80%.

Результати багаторазових вимірювань були використані для розрахунку стандартної невизначеності за типом А, паспортні дані приладів – для розрахунку стандартної невизначеності за типом В [11].

Розрахунок стандартної невизначеності за типом А  $u_A$  було здійснено із використанням наступної формули:

$$u_{A\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

де  $\bar{x}$  – середньо-арифметичне значення результатів багаторазових вимірювань;  $n$  – число багаторазових вимірювань.

Розрахунок стандартної невизначеності за типом В проводився за формулою:

$$u_B = \frac{\Theta}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

де  $\Theta$  – границі невиключеної систематичної похибки;  $\sqrt{3}$  – коефіцієнт, пов'язаний із прямокутним розподілом щільності ймовірності.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання масової частки води у зразку подрібненого насіння визначається за формулою:

$$u_C(\bar{W}) = \sqrt{u_B^2(m) \sum_{i=1}^2 C_{mi}^2 + u_B^2(m) \sum_{i=1}^2 C_{mli}^2 + u_B^2(m) \sum_{i=1}^2 C_{m2i}^2 + u_A^2(\bar{W})},$$

де  $C_{m_i}$  – коефіцієнти чутливості невизначеності вимірювання масової частки води до невизначеності вимірювання маси  $m$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ;  $u_B(m) = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} \rho$  – стандартна невизначеність за типом В вимірювання маси;  $u_A(\bar{W})$  – стандартна невизначеність за типом А вимірювання масової частки води.

Значення сумарної стандартної невизначеності вимірювання масової частки води у зразку подрібненого насіння становить  $u_C(\bar{W}) = 0,01797\%$ .

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання вмісту олії у зразку насіння визначається за формулою:

$$u_C(\bar{X}^*) = \sqrt{u_A^2(\bar{X}^*) + C_{\bar{W}}^2 \cdot u_C^2(\bar{W}) + u_B^2(X_i) \sum_{i=1}^5 C_{X_i}^2}, \quad (8)$$

де  $u_A(\bar{X}^*)$  – стандартна невизначеність за типом А вимірювання вмісту олії у зразку насіння у перерахунку на суху речовину, %;  $C_{\bar{W}}$ ,  $C_{X_i}$  – коефіцієнти чутливості невизначеності вимірювання вмісту олії у зразку насіння у перерахунку на суху речовину до невизначеності вимірювання масової частки вологи та вмісту олії;  $u_B(X_i) = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} \text{ г}$  – стандартна невизначеність за типом В вимірювання маси;  $u_C(\bar{W})$  – сумарна стандартна невизначеність вимірювання масової частки вологи, %.

Розрахунок стандартної невизначеності за типом А вимірювання вмісту олії у зразку насіння було проведено за наступною формулою:

$$u_A(\bar{X}^*) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i^* - \bar{X}^*)^2},$$

де  $X_i^*$  –  $i$ -те значення результату вимірювання вмісту олії у насінні;  $\bar{X}^*$  – середньо-арифметичне значення вмісту олії у насінні;  $n$  – число багаторазових вимірювань ( $n = 5$ ).

Значення стандартної невизначеності за типом А вимірювання вмісту олії у зразку насіння дорівнює  $u_A(\bar{X}^*) = 0,07287\%$ .

Значення сумарної стандартної невизначеності вимірювання вмісту олії у зразку насіння склало  $u_C(\bar{X}^*) = 0,07329\%$ .

Розрахунок стандартної розширеної невизначеності вимірювання вмісту олії у зразку насіння було виконано за наступною формулою:

$$U = k \cdot u_C(\bar{X}^*), \quad (9)$$

де  $k$  – коефіцієнт охоплення, який визначається як коефіцієнт Ст'юдента для довірчої ймовірності  $P = 0,95$  та ефективного числа ступенів вільності, яке розраховується за формулою Велча-Саттерствейта [11];  $u_C(\bar{X}^*)$  – сумарна стандартна невизначеність вимірювання вмісту олії у зразку насіння.

Розрахунок ефективного числа ступенів вільності було проведено із використанням формули Велча-Саттерствейта:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_C^4(\bar{X}^*)}{\frac{u_A^4(\bar{X}^*)}{n-1} + \frac{u_C^4(\bar{W}) \cdot C_{\bar{W}}^4}{v_{\text{eff } \bar{W}}}}, \quad (10)$$

де  $v_{\text{eff } \bar{W}}$  – ефективне число ступенів вільності при вимірюванні масової частки вологи;  $n$  – число багаторазових вимірювань вмісту олії у зразку насіння ( $n = 5$ );  $u_C(\bar{X}^*)$  – сумарна стандартна невизначеність вимірювання вмісту олії у зразку насіння;  $u_A(\bar{X}^*)$  – стандартна невизначеність за типом А вимірювання вмісту олії у зразку насіння у перерахунку на суху речовину, %;  $u_C(\bar{W})$  – сумарна стандартна невизначеність вимірювання масової частки вологи, %;  $C_{\bar{W}}$  – коефіцієнт чутливості невизначеності вимірювання вмісту олії у зразку насіння у перерахунку на суху речовину до невизначеності вимірювання масової частки вологи.

Розраховане значення ефективного числа ступенів вільності дорівнює  $v_{\text{eff}} = 4,09$ . Використовуючи дані таблиці розподілу Ст'юдента, приймаємо ефективне число ступенів вільності  $v_{\text{eff}} = 4$ . У цьому разі коефіцієнт Ст'юдента дорівнює  $t_{0,95} = 2,78$ .

Ефективне число ступенів вільності при вимірюванні масової частки вологи  $v_{\text{eff } \bar{W}}$  визначалося за формулою:



$$v_{\text{eff } \bar{w}} = \frac{u_C^4(\bar{W})}{u_A^4(\bar{W}) \cdot (n-1)} \quad (11)$$

Отримане із формули (11) ефективне число ступенів вільності при вимірюванні масової частки вологи становить  $v_{\text{eff } \bar{w}} = 1,01$ .

Визначена за формулою (9) стандартна розширена невизначеності вимірювання вмісту олії у зразку насіння склала  $U = 0,20\%$ .

Таким чином, результат вимірювання вмісту олії у зразку насіння нової лінії може бути записаний як:

$$X^* = (40,61 \pm 0,20)\%, P = 0,95.$$

#### Висновки:

1. У роботі представлено результати дослідження фізико-хімічних показників якості насіння соняшника нової лінії X 114 В.

2. Наведено розрахунок невизначеності вимірювання при дослідженнях показників якості і безпеки соняшникової олії на прикладі дослідження вмісту олії у насінні соняшника при реалізації методу екстракції.

3. Стандартна розширена невизначеність вимірювання вмісту олії у зразку насіння у перерахунку на суху речовину склала  $U = 0,20\%$ .

#### Джерела інформації

1. ДСТУ 4492:2005 Масло подсолнечное. Технические условия. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.01.2007.

2. ДСТУ 4603:2006 Олії. Методи визначення масової частки вологи та летких речовин. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.01.2008.

3. ДСТУ 7082:2009 Олії. Методи визначення масової частки фосфоровмісних речовин. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.01.2011.

4. ДСТУ 4350:2004 Олії. Методи визначення кислотного числа» (ISO 660:1996, NEQ). Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.10.2005.

5. МВВ 081/12-0243-05 Методика виконання вимірювання масової частки залишкових кількостей хлороорганічних пестицидів у жирних продуктах методом газорідної хроматографії.

6. ДСТУ 4570:2006 Жири рослинні та олії. Метод визначення пероксидного числа. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.01.2008.

7. DSTU 7577: 2014 Насіння олійне. Визначення вмісту олії методом екстракції в апараті Сокслета. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.05.2015.

8. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

9. Особенности оценивания неопределенности результатов параллельных измерений / И.П. Захаров, А.П. Сергиенко, М.П. Сергиенко // "Системы обработки информации" Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, – 2008, Вип. 4(71), С. 34-37.

10. Оценка неопределенности измерения физико-химических показателей качества и безопасности подсолнечного масла / И.П.Захаров, Т.В. Чунихина, В.Ю. Папченко // "Системы обработки информации" Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, – 2018, Вип. 4(155), С. 109-113.

11. EURACHEM/CITAC Guide CG. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Third Edition.

<sup>1</sup>Захаров И. П., <sup>2</sup>Чунихина Т. В., <sup>3</sup>Папченко В. Ю.

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники

<sup>2</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

<sup>3</sup> Украинский научно-исследовательский институт масел и жиров Национальной аграрной академии наук Украины

## ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЕМЕНА ПОДСОЛНЕЧНИКА НОВОЙ ЛИНИИ

*Масложировая отрасль является ведущей в пищевой промышленности Украины. Возрастающий за последние годы объем производства подсолнечного масла объясняется увеличением урожая и повышением содержания масла в семенах подсолнечника. В работе представлены результаты исследования физико-химических показателей качества семян подсолнечника новой линии. Детально рассмотрен процесс исследования одного из показателей качества, содержания масла в семенах подсолнечника, с использованием метода экстракции. На примере одного из показателей качества, содержания масла в семенах подсолнечника, показан расчет неопределенности измерения этого показателя.*

**Ключевые слова:** *семена подсолнечника, физико-химические показатели качества, метод экстракции, параллельные измерения, неопределенность измерения.*

<sup>1</sup>I. Zakharov, D.Sc., <sup>2</sup>T. Chunikhina, C.Sc., <sup>3</sup>V. Papchenko, C.Sc.

<sup>1</sup> Kharkiv National University of radioelectronics

<sup>2</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

<sup>3</sup> Ukrainian Scientific Research Institute of Oils and Fats of the National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine

## EVALUATION OF UNCERTAINTY OF MEASUREMENTS IN NEW LINE SUNFLOWER SEED RESEARCH

*Oil and fat industry is the main branch of the food industry in Ukraine. Increasing during the last few years volume of the production of the sunflower oil is caused by increase of the harvest and increase of the concentration of the oil in the sunflower seed. The results of the research of the quality of the sunflower seed of the new line are presented in the work. The process of the investigation of the one of the physical and chemical parameters of the quality of the sunflower seed, the concentration of the oil in the seed, was considered in detail. The example of the account of the uncertainty of the measurement of the concentration of the oil in the sunflower seed is given.*

**Keywords:** *the sunflower seed, physical and chemical parameters of the quality, extraction method, the parallel experiments, the uncertainty of the measurement.*

УДК 631.356.22

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-7>

Ліннік А.Ю. к.т.н., Диня В.І. к.т.н., Фльонц О.В. к.т.н., Дубчак Н.А. к.т.н..

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

### АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОЧИСНИКІВ ГИЧКИ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

*Якісне очищення голівки коренеплоду цукрових буряків від гички є одним із важливих факторів, який впливає на подальше викопування, зберігання та переробку коренів на цукор. Оскільки при наявності залишків гички та пошкоджень тіла кореня погіршуються умови зберігання коренеплодів, збільшуються затрати на транспортування сировини та втрати її під час зберігання та переробки слід застосовувати раціональну технологію очистки та відповідні машини. З метою визначення раціональної технології і застосування пристроїв для очищення коренів проведено аналіз існуючих технологій та конструкцій машин для очищення гички з поверхні голівок коренеплодів цукрових буряків виходячи з умов підвищення якості процесу очищення та зниження ступеня пошкодження тіла коренеплоду із урахуванням характеристик посівів – урожайність, засміченість бур'янами, рельєфом поля, тощо. Зосереджено увагу на конструктивних рішеннях очисників для очищення гички буряків на корені та розглянуто ряд конструкційно відмінних очисних пристроїв, визначено особливості роботи кожної конструкції та проведено аналіз якісних показників роботи.*

**Ключові слова:** цукровий буряк, коренеплід, гичка, залишки гички, якість очищення, зчісування, пошкодження.

Очищення гички цукрових буряків з голівки коренеплоду передуює процесу викопування коренів буряка і є першою технологічною операцією цього процесу. Від якісних показників виконання якої будуть залежати умови роботи викопувальних та ворохоочисних механізмів чи машин, а також зберігання коренеплодів після викопування. Складність якісного очищення голівок коренів цукрового буряка зумовлена рядом факторів: нерівномірність росту коренів по висоті, відхилення від осі рядка, наявність сухих та полеглих пагонів гички, значний залишковий запас міцності зв'язку черешок гички-голівка коренеплоду. В результаті чого створено на сьогоднішній день ціле різноманіття пристроїв для очищення гички, які різняться за способом очистки (на корені, в машині після викопування), за напрямком використання гички (на корм, в якості добрива) та конструктивними особливостями. Причому, відмічається надмірне використання енергії на виконання цієї операції, що обумовлює необхідність зниження питомих енерговитрат.

Згідно описаної вище проблеми поставлено завдання провести аналіз технологій та конструкцій очисників гички цукрових буряків з метою виявлення їх недоліків, та на підставі цього аналізу розробити рекомендації щодо їх застосування.

Механізована технологія збирання цукрового буряка є чи не одною із найзатратніших і довгосторокових сільськогосподарських технологій, яка поєднує цілий ряд операцій, таких як: очистка коренеплодів від гички, викопування коренеплодів, очистка вороху, завантаження і транспортування коренеплодів.

Високий ступінь забруднення викопаних коренеплодів залишками гички негативно впливає на зберігання коренеплодів, оскільки процеси гниття починаються саме із залишків гички та з місць пошкоджень тіла коренеплоду, також на процес цукроваріння, що в свою чергу веде до збільшення витрат на сам процес, а відповідно збільшується собівартість кінцевого продукту. Тому процес доочищення коренеплодів від залишків гички має важливе значення.

Відомо дві основні технологічні схеми очищення гички коренеплодів [1]:

- очищення гички на корені (попередньо очищується гичка, а потім викопується коренеплід)

- очищення гички в комбайні (викопується коренеплід разом з гичкою після чого гичка відокремлюється)

Другий спосіб очищення коренів не набув широкого поширення через неефективність самого процесу, що пояснюється необхідності вирівнювання коренеплодів в комбайні, який виконується складним механізмом вирівнювання, що веде до нестабільності самого процесу. І крім того, неможливо досягти необхідної чистоти відокремлення гички лише за рахунок одного

обрізання, яке не дає можливості досягти необхідної чистоти відокремлення гички від кореня (не більше 5% від загальної маси) при оптимальних відходах цукроносною маси.

Натомість очищення гички на корені набуло досить великого поширення. Сам процес очистки коренеплодів складається з двох частин – зрізання гички і очищення голівок коренеплодів.

Зрізання гички за різними технологічними вимогами і конструкторськими рішеннями проводяться за такими схемами [2]:

- безкопінний зріз пасивним або активним ножами проводиться на фіксованій висоті незалежно від висоти росту коренеплодів;

- зріз гички при копіюванні висоти росту кореня, а також його розміщення відносно осі рядка. В такій схемі можуть використовуватися як і пасивні так і активні ножі.

Очищення голівок коренеплодів проводять після зрізування гички. Процес очищення виконується з використанням цілого спектру різних за конструктивними особливостями робочих органів.

Технологічні схеми гичкоочищувальних машин значною мірою ускладнюються збиранням відокремленої гички з послідовним її використанням в якості корму. Проте, на сьогоднішній день все більшого поширення набуває спосіб використання гички в якості добрива. Для цього гичка подрібнюється і розкидається на поверхню поля. Таке явище пояснюється значним спрощенням конструкції гичкоочищувальних машин, що в свою чергу підвищує надійність роботи машини, а також в малій кормо придатності гички у зв'язку з високим вмістом в ній азотистих речовин.

В технологічному процесі збирання цукрових буряків очищення голівок коренеплодів від залишків гички проходить в вузькому проміжку технологічного процесу.

Якість виконання роботи і продуктивність очисника впливає на якість викопаних коренеплодів, надійність роботи коренезбиральних машин і на продуктивність всього збирального комплексу.

Основним робочим органом очисника голівок коренеплодів являється очисний елемент, який може зрізувати, зчісувати чи силою удару оббивати залишки гички з коренеплоду.

Відомі конструкції гичкоочисних пристроїв поділяються їх на очисники та обрізувачі гички. Обрізувачі гички найчастіше зустрічаються на причіпних та самохідних бурякозбиральних комбайнах фірм Ropa, Grimme, Matrot, Holmer, Stoll, Kleine. Вони в переважній більшості виконані у вигляді обрізних ножів різної конструкції встановлених на рамі машини і проводять обрізку частини голівки кореня разом із гичкою. Після чого гичка потрапляє на поверхню поля і використовується в якості добрив. Така конструктивна схема характеризується надзвичайною простотою та надійністю очисника – обрізуючого ножа. Відносно високі якісні показники такий очисник може забезпечити на чистих незабур'ячених полях з середньою та рівномірною врожайністю коренеплодів, з рівним рельєфом та за сприятливих погодних умов. В складних польових умовах, особливо при нерівномірному рості коренеплодів та зміщеням кореня відносно осі рядка більше 5-6см, даний очисник незадовільняє агротехнічні вимоги щодо якості очищення голівки кореня від гички, оскільки мають місце наступні фактори: обрізання частини коренеплоду більше 8%, залишки необрізаної гички та великі за розміром черешки, сильні пошкодження тіла кореня [3].

Розглянемо конструкції існуючих гичкорізальних апаратів та очисників, що використовуються для очищення коренеплодів від гички [4]. В конструктивній схемі бурякозбирального комбайна Holmer Terra Dos T3 (якість обрізування головок 77,9%) використовується гичкорізальний апарат з мінімальним зрізом. Незалежно від висоти коренеплоду проходить незначний його зріз, який точно регулюється. Зрізання гички відбувається за допомогою різального апарату роторного типу, на якому шарнірно закріплені ножі. Обрізування головок коренеплодів здійснюється обрізувачами з пасивними гребінчастими копірами та пасивними ножами, що встановлені під кутом до рядка.

Бурякозбиральний комбайн Franz Kleine SF 10 обладнується інтегральним та серійним гичкорізами, що складаються із валу подрібнювача гички, транспортуючого шнека гички, гичкорозкидача і обрізувача, який змонтований на лижній рамі [5]. Оператор комбайна має можливість проводити регулювання висоти і частоти зрізу в залежності від відстані між коренеплодами, а також враховуючи рівні заглиблення коренеплодів у ґрунті. Використання обрізувача гички «Opti-cut» (рис. 1.а.) дозволяє підвищити якість очищення головок коренеплодів до 79,4%. Даний обрізувач обладнаний функцією автоматичного регулювання

товщини зрізу, що дозволяє забезпечувати оптимальну якість зрізу гички при різних агрокліматичних умовах. Її конструкція передбачає використання плоского пасивного ножа та гребінчастого копіра.

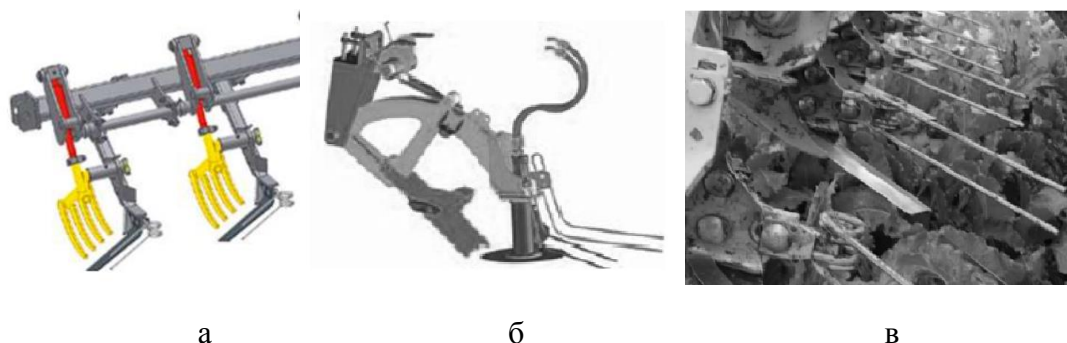


Рис.1. Обрізувачі гички коренеплодів:

а - обрізувач гички «Opti-cut»; б - обрізувач з активним дисковим ножом Grimme Maxtron 620; в - робочі органи гичковидаляючого апарату бурякозбирального комбайна ROPA euro-Tiger

Grimme Maxtron 620 – шестирядний комбайн із 22 – х тонним бункером обладнується роторною косилкою – подрібнювачем. Ножі зрізують та подрібнюють гичку над рядками, а направляючі щитки вкладають її в міжряддя (якість обрізування головок - 69,6%).

Ніж обрізувача головок коренеплодів обладнаний щупом для автоматичного визначення їх розмірів. Її конструкція (рис. 1.б.) дозволяє проводити регулювання товщини зрізу за допомогою електрогідравлічного приводу, а також забезпечувати постійний горизонтальний зріз головок, що розташовані низько над ґрунтом.

Бурякозбиральний комбайн ROPA euro-Tiger (якість обрізування головок коренеплодів 79,1%) обладнаний обрізувачем, який монтується на паралелограмній підвісці з автоматичним регулюванням сили зрізу, що забезпечує оптимальне очищення головок коренеплодів від залишків гички незалежно від їхньої висоти (рис. 1.в.) [6].

Вітчизняною машиною для збирання коренеплодів цукрових буряків зі схожою конструктивною схемою є МБП-6, що виготовляється Дніпропетровським комбайновим заводом. Даний агрегат обладнаний механізмом безкопірного зрізу гички (активний ротор на якому кріпляться біла), та обрізувачем (пасивний гребінчастий копір та плоский ніж).

Очисники гички цукрових буряків характеризуються кращими якісними показниками роботи ніж з обрізувачі, проте є набагато складнішої конструкції та енергоємними. Даний конструкційний тип машин може якісно працювати на складних посівах в агротехнічному плані. Очисники поділяються на дві принципово різні конструктивні типи – з горизонтальним та вертикальним робочим валом.

В бурякозбиральних машинах застосовується ціла гама різноманітних конструкцій очисників головок коренеплодів з горизонтальним робочим валом. Даний тип очисників застосовується переважно у машин призначених для збирання гички як корму в якості доочисників голівок коренеплодів. Яскравим представником такого типу машин виступає гичкозбиральна машина БМ-6 та її модифікації Тернопільського комбайнового заводу де найбільше розповсюдження отримала компоновальна схема доочисника, зображеного на рис. 2 [7]. Такий доочисник складається з рами, опорних коліс, які копіюють рельєф поля, горизонтального валу, на якому по гвинтовій лінії закріплені еластичні очисні бичі, виготовлені з гуми або

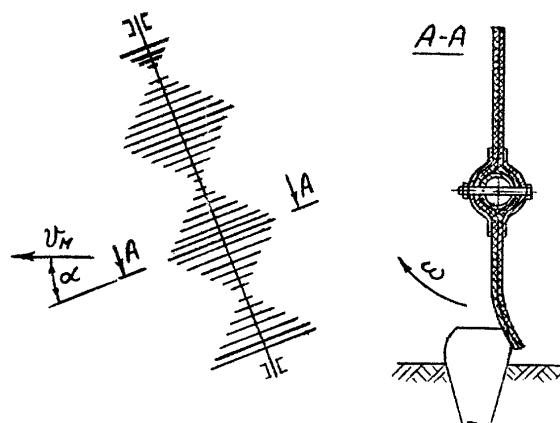


Рис.2. Компоновальна схема очисника та принцип роботи бича

поліуретану. За конструктивним виконанням бичі можуть бути прямокутної, квадратної або круглої форми.

При обертанні валу кінці еластичних бичів вдаряють по вершинах коренеплодів і збивають з них залишки гички, які виносять за межі оброблюваної зони. Винесення залишків гички на зібрану частину поля відбувається за рахунок розташування площини обертання ротора під кутом  $15...17^{\circ}$  до напрямку руху машини. Конструктивні особливості даного очисника дозволяють проводити копірне очищення залишків гички в незалежності від висоти росту коренеплодів, відхилення розміщення коренів від осьової лінії рядка. Також до позитивних сторін слід віднести необхідність тільки одного приводного механізму, що значно спрощує конструкцію машини вцілому.

З метою підвищення технологічної надійності очисників шляхом подрібнення і розсіювання рослинних залишків (рис. 3) на горизонтальному валу, між очисними бичами, шарнірно закріплені подрібнюючі елементи, які розташовані з радіальним зміщенням один відносно одного [8].

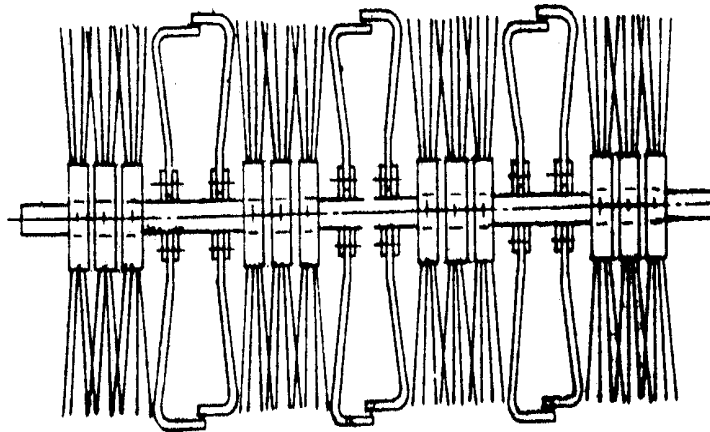


Рис.3. Очисник з подрібнюючими елементами між бичами

При переміщенні очисника вздовж рядків поля, гичка і рослинні залишки змітаються в міжряддя, де подрібнюються ножами і розкидаються по полю. Недоліком розглянутого очисника є висока ймовірність пошкодження коренеплодів ножами, при зміщенні рами відносно рядків, що в реальних умовах експлуатації відбувається досить часто.

Характерними недоліками очисників з горизонтальним робочим валом є «темна зона» голівки коренеплоду розміщена із зворотньої сторони початкової точки контакту очисника з голівкою кореня; суцільна зона обробітку на всій довжині робочого валу призводить до підвищення енерговитрат, оскільки проводиться обробіток міжрядь; низька роботоздатність еластичних очисних елементів та складність і довготривалість їх заміни.

Очисники гички цукрових буряків з вертикальним робочим валом представлені широким різноманіттям конструкцій робочих органів. Робочі органи мають вертикальну вісь обертання і конструктивно виконані у вигляді валу з закріпленим на ньому дисковим робочим елементом, які бувають різних типів: плоскі, тарілчасті, комбіновані. Такі робочі органи мають закріплені по радіусу диска очисні елементи у вигляді щіток, прутків, ланцюгів, бичів тощо.

Плоский доочисник, який зображений на рис. 4.а. характеризується наявністю комбінованих робочих органів виконаних у вигляді ланцюгів і пружних прутків, які встановлені по черзі [9]. Така конструкція забезпечує високу ступінь доочищення коренеплодів від залишків гички, але завдає коренеплодам глибоких вм'ятин і сколів поверхні кореня.

Дискові тарілчасті доочисники за своєю конструктивною будовою нагадують доочисники плоского типу, їх основна відмінність полягає в тому, що замість плоского диска використовується опукла тарілка, яка дає можливість більш точно копіювати поверхню голівки коренеплоду.

Представником такого типу доочисників виступає доочисник (рис 4.б) в якого на площині диска жорстко закріплені зуби виготовлені з твердого або еластичного матеріалу [10]. Своєю поверхнею зубці ковзають по поверхні голівки коренеплоду тим самим зчісуючи

залишки гички. Попри задовільне копіювання поверхні голівки коренеплоду та якісне очищення коренів із незначним відхиленням від осі рядка в даних конструкціях є ряд недоліків, а саме недостатнє очищення низькорослих та малих коренеплодів та часте вибивання високорослих коренів з рядка.

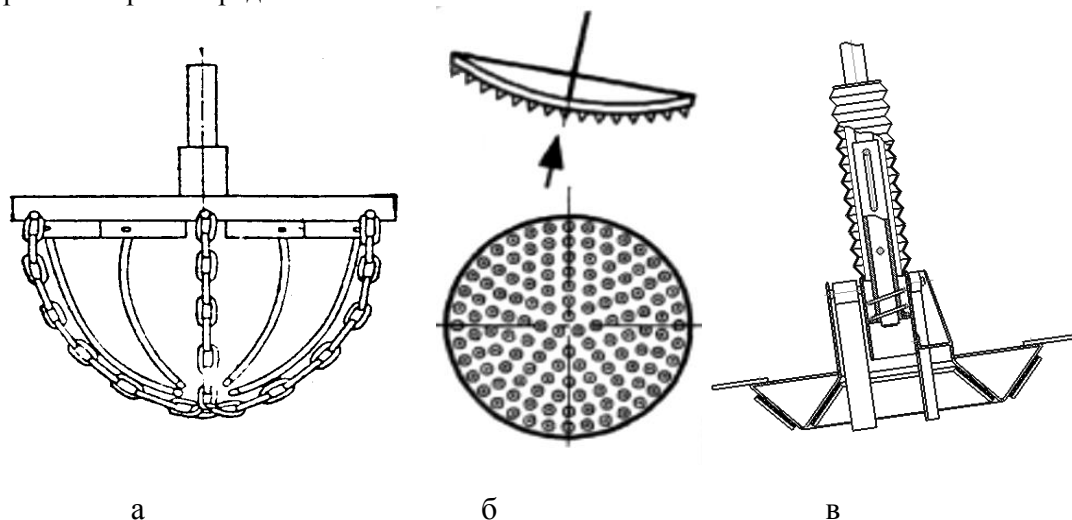


Рис.4. Активні очисники гички коренеплодів з вертикальним валом:  
а - плоский очисник з ланцюгами і петлями; б - тарілчастий очисник з зубами;  
в – комбінований очисник

Конструктивно більш складними пристроями виступають комбіновані очисники. Представник даного типу конструкцій зображений на рис 4.в. [11]. Конструкція таких пристроїв передбачає копірне зрізування гички та послідовне очищення залишків одним робочим органом. Пристрій для зрізування гички та очищення головок коренеплодів цукрових буряків працює наступним чином. При русі агрегату вздовж рядка приводиться в рух вал і відповідно диск, котрий приводить в рух ножі та очисні елементи. Гичка зрізується ножами і відкидається з оброблювальної зони. Очищення від залишків гички проходить в два етапи: спершу при копіюванні висоти росту коренеплоду в контакт з голівкою вступають очисні накладки, закріплені на копіюючій частині диска, обчісуючи черешки гички за рахунок своєї профільної поверхні, яка являє собою набір пружних еластичних зубців на спільній основі, далі очисні елементи проводять додаткове обчісування залишків гички на голівці коренеплоду. Таким чином, відбувається одночасне зрізування гички з винесенням її за межі рядка та очищення головок коренеплодів.

Копіювання висоти росту коренеплодів виконується копіювальною частиною диска наступним чином. При зустрічі з високим коренеплодом конус ковзас по голівці коренеплоду і піднімає диск на необхідну висоту. Після проходження голівки коренеплоду під дією пружини диск опускається, при цьому очищений коренеплід не впливатиме на копіювання висоти росту наступного коренеплоду, оскільки проходить під поверхнею копіювальної частини диска завдяки куту нахилу осі валу до вертикалі.

Розміщення копіювального елемента безпосередньо на очисному диску забезпечує підвищення якості очистки голівок коренеплодів та спрощує в цілому конструкцію очисника.

Попри складність конструкції та необхідності окремого приводу на кожний очисний пристрій розглянута конструкція очисника здатна забезпечити якісні агротехнічні вимоги та проводити очищення кореня одним робочим органом без пошкодження тіла коренеплоду.

**Висновки.** Як бачимо з вище проведеного аналізу конструктивних схем очисників гички голівок коренеплодів цукрових буряків очищення проводиться жорсткими та еластичними робочими елементами. Кожен тип робочих органів має свої позитивні сторони та недоліки. Очисники забезпечують чистоту очистки шляхом оббивання і зчісування залишків гички, проте робота жорстких робочих елементів характеризується частими сколами тіла коренеплоду та вибивання їх з рядків посівів, еластичні, в свою чергу, часто залишають «темну зону» голівки коренеплоду, яка розміщена із зворотньої сторони початкової точки контакту очисника з голівкою кореня, особливо в очисниках з горизонтальною віссю обертання робочого валу.

Із точки зору якості очищення, очисники з вертикальною віссю обертання є більш раціональні в застосуванні. Оскільки, така конструкція може забезпечити роботу очисного елемента на всій поверхні голівки коренеплоду, копіювання висоти росту коренів та зміщення від осі рядка чим досягається вища якість очищення при відсутності пошкодження тіла коренеплоду, проте характеризується необхідністю приводу на кожний робочий вал та конструктивно складне виконання самого очисника, що веде за собою збільшення енерго- та металоємності конструкції і відповідно до її здорожчання.

#### Інформаційні джерела

1. Козіброда Я.І. Тенденції розвитку машин для збирання цукрових буряків. Тернопіль: Збруч, 1996, 91с
2. Погорельый Л.В., Брей В.В. Сравнительный анализ и тенденции развития свеклоуборочных машин. Тракторы и сельхозмашины, 1975. №10. С. 21-24.
3. Рибак Т.І., Цьонь О.П. Огляд гичковидаляючих апаратів бурякозбиральних машин та шляхи їх вдосконалення. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, технічні науки. Вип. 134. «Технічний сервіс машин для рослинництва». Харків, 2013, с.203-207.
4. Мартиненко В.Я., Фенканін В.П. Аналіз результатів дослідження зрізування гички пасивним підпружиненим ножом. Вісник ХДТУСУГ, Вип. 29. "Механізація сільськогосподарського виробництва", Харків, 2004, С. 206 – 210.
5. Zuckerrüben - Erntemaschine SF10 II. Проспект фірми Franz Kleine. - Maschinenfabrik GmbH & Co, Postf. 1250.
6. Rora euro-Tiger V8-3. Проспект фірми Rora. – Rora Fahrzeug - und Maschinenfabrik GmbH.
7. Очистник головок коренеплодів від гички на корені. Данильченко М.Г., Гевко Р.Б., Мартиненко В.Я. Патент України на винахід №3204 МПК А 01 D23/02 №94230332; заявл. 11.01.91; опубл. 16.05.94, Бюл. №5-1.
8. Очиститель головок корней свеклы. Н.В. Татьяна, И.П. Бабко, В.А. Гробузинский, Ю.М. Залеский. А.с. 818536 СССР, МКИ А 01 D23/02. №2838624/30-15; заявл. 12.11.79, опубл. 07.04.81, Бюл. №13.
9. Очиститель корнеплодов от остатков ботвы на корню. Л.В.Погорельый, В.П.Максимчук и А.С.Кравченко. А. с. 980655 СССР, МКИ А 01 D23/02. №3268210 / 30-15; заявл. 27.03.81; опубл. 15.02.82, Бюл. №46
10. Очиститель головок корнеплодов от ботвы на корню. В.Я. Мартиненко, М.Г. Данильченко, И.Н. Маркович, О.Г. Бессонов А. с. 1017203 СССР, МКИ А 01 D23/02 №3673270 / 30-15; заявл. 16.11.83, опубл. 23.06.82, Бюл. №9
11. Пристрій для зрізування гички та очищення головок коренеплодів цукрових буряків. Ліннік А.Ю., Білик С.Г., Фльонц О.В., Семенів І.І., Кирик О.М., Носко В.Л. Патент на кор. модель № 105546 МПК А 01D 23/02 (2006.1) № u201509074 Заявл. 21.09.15, Опубл. 25.03.16. Бюл №6.

**Линник А.Ю. к.т.н., Дыня В.И. к.т.н., Фльонц О.В. к.т.н., Дубчак Н.А. к.т.н..**

Отделенное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины "Бережанський агротехнический институт"

#### АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ОЧИСТИТЕЛЕЙ БОТВЫ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

*Качественная очистка головки корнеплода сахарной свеклы от ботвы является одним из важных факторов, который влияет на дальнейшее выкапывание, хранение и переработку корешей на сахар. Поскольку при наличии остатков ботвы и поврежденной тела корня ухудшаются условия хранения корнеплодов, увеличиваются затраты на транспортировку сырья и потери ее во время хранения и переработки следует применять рациональную технологию очистки и соответствующие машины. С целью определения рациональной технологии и применения устройств для очистки корешей проведен анализ существующих технологий и конструкций машин для очистки ботвы из поверхности головок корнеплодов сахарной свеклы исходя из условий повышения качества процесса очистки и снижения степени повреждения тела корнеплода с учетом характеристик посевов - урожайность,*

© Ліннік А.Ю. к.т.н., Дыня В.І. к.т.н., Фльонц О.В. к.т.н., Дубчак Н.А. к.т.н..



засоренность сорняками, рельефом поля, и тому подобное. В частности, сосредоточено внимание на конструктивных решениях очистителей для очистки ботвы свеклы на корне. Рассмотрен ряд конструктивно отличных очистительных устройств, определены особенности работы каждой конструкции и проведен анализ качественных показателей работы.

**Ключевые слова:** сахарная свекла, корнеплод, ботва, остатки ботвы, качество очистки, счесывания, повреждения.

**A. Linnik Ph. D., V. Dynja Ph. D., Flonts O. Ph. D., Dybchak N.A. Ph. D..**

Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine Berezhany Agrotechnical institute

#### **ANALYSIS OF CONSTRUCTIONS OF SUGAR BEET CLEANERS**

*The good cleaning of the head of the sugar beet root is one of the important factors that affects the further digging, storage and processing of the roots for sugar. As root residues and damage to the root body deteriorate the storage conditions of the roots, the cost of transporting the raw material and its loss during storage and processing will increase. In order to determine the rational technology and use of devices for root cleaning, the analysis of existing technologies and designs of machines for cleaning the branch from the surface of the heads of the root crops of sugar beet was conducted based on the conditions of improving the quality of the cleaning process and reducing the degree of damage to the body of the root, taking into account the characteristics of crops - yield yams, terrain, etc. In particular, the focus is on the design solutions of purifiers for cleaning beetroot on the roots. A number of different structural cleaning devices are considered, the features of each design are determined, and the quality indicators of the work are analyzed.*

**Keywords:** sugar beet, root crop, willow, willow residue, quality of cleaning, combing, damage.

UDC 621.822.681.2:369.64

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-8>V. Marchuk<sup>1</sup>, D.Sc., T. Dzhuguryan<sup>2</sup>, D.Sc., I. Marchuk<sup>1</sup>, Ph.D, L. Sachkovska<sup>1</sup><sup>1</sup>Lutsk National Technical University<sup>2</sup>Shetsin maritime academy (Poland)**THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE GRINDING SURFACE QUALITY RING ROLLER**

*A series of experimental researches was carried out in the work, which confirmed the results of modeling of temperature processes in the zone of centerless intermittent grinding of billet rings. The constructed response surfaces of the dependence of the roughness parameter Ra on the grinding modes and the number of grooves of the grinding wheel form the basis of the developed technique for designing grinding operations and tool adjustments of grinding machines. The contact area of the abrasive circle with the workpiece is a narrow strip of rectangular shape that moves along the workpiece surface. In this case, the temperature field can be calculated according to the scheme of a moving infinitely long surface-band source. The plan, the program and the hardware of experimental researches of the connection of design and technological factors and indicators of grinding operations with parameters of quality of grinding surfaces, temperature of grinding, power parameters of the process of grinding by discontinuous grinding circles and constructive circles have been developed.*

**Keywords:** grinding, temperature, quality.

Temperature defects that arise in grinding operations of processing surfaces of revolution outer ring roller not only adversely affect the performance properties of the bearing, such as durability, precision-based, durability, reliability, but also cause a significant impact on future operations grinding track bearing rings due to the principle of technology hereditary defects between operations.

For example, during the grinding track rolling ring bearing 7000 series billets to bezentrovo grinding operations based on the machine SASL5AD with pre-treated outer cylindrical surface, so inaccuracies basing transferred to malfunctioning internal processing paths bearing outer ring.

In addition to manufacturing defects analysis centreless-grinding operations showed that 30% of all defects after polishing rings refers to the temperature. Therefore, the establishment of efficient temperature parameters and their relationships with those centreless grinding process workpieces rings perenalahodzhualnoho in terms of production is relevant scientific and technical challenge and requires careful analysis of the causes and types of thermal origin defects and search methods and means to address them.

During the grinding temperature field in the coordinate system coupled to the source begins to go to a state of thermal saturation process is established and becomes quasi field. The interval until the next cycle should be such that the surface had time to cool to its original temperature. This process can be realized if the surface is not abrasive wheel to make continuous and intermittent, ie, break it into a series of performances that alternate. To determine the size and performance of the cutting grooves need to know a thermal saturation and the cooling to the original temperature.

To solve this heat problem related to the calculation of the temperature in the cutting zone at work was adopted following calculation scheme [1, 2, 3, 4, 5].

A mathematical model of determining the temperature of the grinding based on the account of the balance of heat that goes into chips and workpiece. In the design scheme [1, 2, 3] allowance for processing, by analogy with the work of Professor. A. Yakimova presented a package of infinitely thin adiabatic rods are in the process of grinding pererizuyutsya a speed  $V_w$ . To simulate thermal processes in the cutting zone to agree to terms that by the time of the heat source  $\tau$  happened adiabatic cutting rod length  $l_1$ , ie the heat source moved along the rod by an amount  $l_1 = V_{pi3} \cdot \tau$  and during this time as a result of cutting isolated heat  $Q$ . This heat is transferred to heat the chips formed, ie areas rod length  $l_1$ , and the quantity of heat equal to  $Q_1$ . On the other hand, the heating section rod length  $l_2$  workpiece material by conduction spent heat  $Q_2$ . Heat balance equation consists of terms  $Q = Q_1 + Q_2$ .

The amount of heat  $Q_1$  is defined as follows. The rod length  $l_1$  conditionally divided into an infinite length set of elementary areas  $\Delta l$ .

Assume that each of the elementary areas heated to different temperatures: the first - to a temperature  $\theta_1$  Second - to a temperature  $\theta_2$  etc. Then the amount of heat that is spent on heating the first section of the rod length  $l_1$ , will be equal to:

$$Q_{l_1} = c \cdot m_1 \cdot \theta_1, \quad (1)$$

where  $c$  - the specific heat of workpiece material, J / (kg · K);  $m_1 = \rho \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot \Delta l$  - the mass of the first section of the rod length  $\Delta l$  Kg;  $\rho$  - density of workpiece material, kg / m<sup>3</sup>;  $V_1$  - volume of the first section of the rod length  $\Delta l$  M<sup>3</sup>;  $S$  - cross-sectional area of the rod, m<sup>2</sup>.

After transformation relation (1) will look like:

$$Q_{l_1} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_1. \quad (2)$$

Similarly, determine the amount of heat  $Q_{l_2}$  and  $Q_{l_n}$ , spent on heating 2nd and n-th rod sections:

$$Q_{l_2} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_2, \quad (3)$$

$$Q_{l_n} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_n. \quad (4)$$

A similar sequence determines the amount of heat  $Q_2$  That is spent on heating rod length adiabatic  $l_2$ :

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \theta_2 \cdot 0,5. \quad (5)$$

After transformation dependence (6) will look like:

$$Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta_2. \quad (6)$$

Heat balance equation is made subject  $Q = Q_1 + Q_2$  and represented as a differential equation of temperature change over time  $\theta = \theta(\tau)$ :

$$\frac{d\theta}{d\tau} \cdot \theta + A \cdot \theta = B, \quad (7)$$

where  $A = \frac{V_{pi3} \cdot N}{\lambda \cdot S}$ ;  $B = \frac{N^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}$ ;  $N$  - power heat source, W;  $\lambda$  - thermal conductivity of the material, W / m · K.

After the solution differential equation in relative terms we get:

$$l_1 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{pi3}} \bar{l}_1; \bar{l}_1 = -\ln(1-z) - z; z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho}\right)}, \quad (8)$$

where  $z$  - a dimensionless quantity, which we call the relative magnitude of temperature;  $\sigma = q/V_{pi3}$  - conventional cutting stress, N / m<sup>2</sup>;  $q$  - heat flux, W / m<sup>2</sup>.

From relation (2) that the relative magnitude of the temperature  $z$  with increasing length of the rod  $l_1 = V_{pi3} \cdot \tau$  (or contact time  $\tau$  grinding wheel with shaft) increases approximately exponential law asymptotically approaching one (Fig. 1). This indicates the existence of sustainable over time thermal process in grinding, implemented with relatively large values  $\bar{l}_1$  (or  $\tau$ ), such as deep grinding.

Using these solutions, the basic parameters of a thermal process in grinding length rod  $l_2$  equal to the thickness of the surface layer of the workpiece, which concentrates heat; instantaneous speed  $V_\theta$  heat diffusion depth consideration adiabatic rod; share of heat  $Q_1/Q$  and  $Q_2/Q$  Transmitted, respectively, in chips, which is formed in the workpiece.

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{riz}} \bar{l}_2; \bar{l}_2 = z; V_\theta = V_{pi3} + \frac{dl_2}{d\tau} = \frac{V_{riz}}{z}, \quad (9)$$

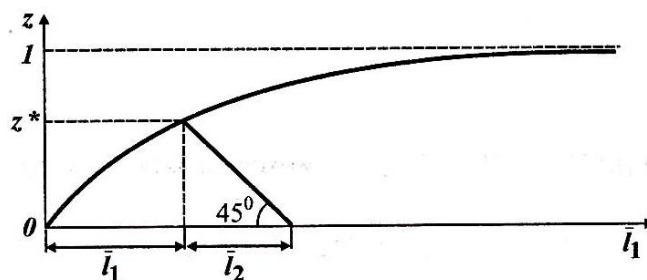


Fig. 1. Relative values of temperature  $z$  dimensionless  $\bar{l}_1$   $\bar{l}_1$

$$\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}; \quad \frac{Q_2}{Q} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (10)$$

From these dependences it follows that the length of the rod  $l_2$  changing the law changes in relative values of temperature  $z$  [1, 2, 3, 5, 6]. instantaneous speed  $V_\theta$  Conversely, with increasing  $z$  continuously decreases asymptotically approaching the value  $V_{riz}$  [4].

Relative values  $Q_1/Q$  and  $Q_2/Q$  determined by only one parameter - the relative magnitude of temperature  $z$ , Fig. 1. Thus, reducing the value of  $z$  implies reduction  $Q_1/Q$  magnification  $Q_2/Q$  by reducing product options  $l_1 \cdot V_{riz}$  according to the relationship. This shows that the distribution of heat between the chips, produced and workpiece surface layer caused by temperature grinding.

For adiabatic boundary surface napivneskinchenoho solid, thermal properties which do not depend on the temperature, with zero initial temperature in the positive direction along the  $Z$  axis at a constant speed  $V_d$  fast moving endlessly extended band width segmentopodibne heat source  $2h$ , with evenly distributed over the contact area, time constant density heat source, and the influence on the heat source temperature distribution outside neglected and entered the assumption that the insulated surface, ie  $X = 0$ .

In order to calculate the positive argument values beginning coordinates associated with source material on the back surface of the source. Under these conditions,

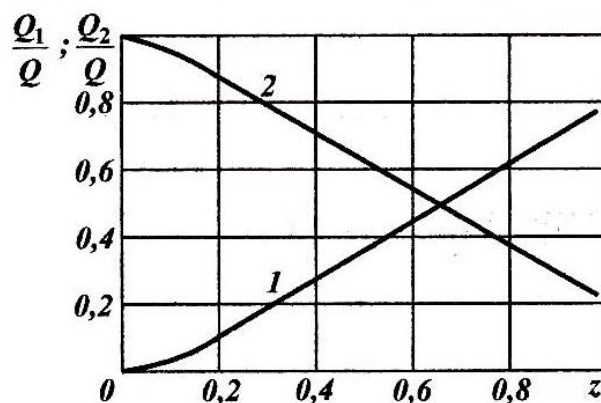


Fig. 2. The dependence of  $Q_1 / Q$  (1) and  $Q_2 / Q$  (2) the

sformulyuyetsya mathematical problem as follows: we have a basic differential equation of heat, considering heat source movement is:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) + V_\theta \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \quad (11)$$

where - the temperature;  $\theta$  - thermal diffusivity;  $V_d$  - speed parts (blanks);  $\tau$  - a contact circle of the workpiece.

The second stage of theoretical calculations of temperature in the cutting zone during intermittent abrasive cutting tool is the determination of the temperature decrease depending on the termination of the grinding process [3, 4, 5, 6].

Consider the problem of free surface temperature change by heat. The change in average temperature feel constant for a fixed time. To assess the cooling of the free surface will take the following heating scheme: since the cooling rate of the surface by heat exchange with AB after the termination of the large heat source, the heat dissipation can be neglected in the Z axis due to heat. By entering this assumption settlement process cooling surface will be slightly slower than real.

Time to reach a certain temperature depends on the speed source that allows you to change the time in a wide range. After the polishing process is stopped, following a small time period during which the surface cools flow AB. The time interval between two successive work performances must be such that the surface would cool down to a certain size. Since the surface in between duty cycle free, heat can significantly change its temperature.

**Conclusions.** Theoretical investigation temperatures for various grinding circuits, we conclude that the limit state temperature field (thermal saturation) occurs immediately after the grinding process. From the beginning of the process to establish the ultimate state there is a small but significant physical length of time during which the grinding takes place in non-stationary mode. The presence of this interim period can be confirmed experimentally, by determining the temperature. Unsteady operation during grinding principle opens the possibility of reducing the contact temperature by periodic interruption.

#### References

1. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78.
2. Марчук В.І. Класифікація та походження температурних дефектів на операціях безцентрового шліфування поверхонь обертання / Марчук, І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеіві / Матеріали Шістнадцятої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво», м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 102–103.
3. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Физические и компьютерные технологии. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С.137–146.
4. Джугурян Т.Г. Марчук І.В. Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві/ «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2017. – Випуск №12(1). - С. 111-119.
5. Марчук І.В., Марчук В.І., Модель стабілізації високочастотних коливних процесів в динамічній системі круглого врізного шліфування. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Перспективні технології та прилади №9. - С.75-83.
6. Марчук І.В. Керування температурою на безцентрово-шліфувальних операціях / М.В. Олексин, А.М. Ештеіві // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 133–138.
7. Марчук І.В. Технологічне керування температурою під час безцентрового шліфування функціональних поверхонь обертання/ Марчук В.І. // «Наукові нотатки». Випуск 61. м. Луцьк, 2018 – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – С. 142-147
8. Марчук І.В. Технологічне забезпечення точності шліфування поверхонь обертання підшипників / І.В. Марчук, А.М. Ештеіві, М.В. Олексин / Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямком “Інженерна механіка”). Вип. 57. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 123–127.
9. Марчук І.В. Технологічне керування точністю поверхонь обертання на операціях механічного оброблення / І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеіві / «Сучасні технології у промисловому виробництві»: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017 р.): у двох частинах / редкол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми: Сумський державний університет, 2017. – Ч. 1. – 31–32 с.
10. Марчук І.В. Технологічне керування точністю поверхонь обертання в умовах

переналагоджувального підшипникового виробництва / І.В. Марчук, А.М. Ештеїві / Збірник тез доповідей XVI-ї Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 16-17 травня 2017 р., м. Київ, Україна. – 2017. – С. 83

11. Марчук В.І. До аналізу джерел та причин походження вібрацій в конічних роликотпідшипниках / В.І. Марчук, І.В. Марчук, А.М. Ештеїві, М.В. Олексин / Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямком “Інженерна механіка”). Вип. 59. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 184–192.

**Марчук В. І<sup>1</sup>., д.т.н., Джугурян Т. Г<sup>2</sup>., д.т.н., Марчук І. В<sup>1</sup>., к.т.н., Сачковська Л. А<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет

<sup>2</sup>Щецинська морська академія (Польща)

### **О ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ**

*В работе проведена серия экспериментальных исследований, подтвердила результаты моделирования температурных процессов в зоне бесцентрового прерывистого шлифования заготовок колец. Построены поверхности отклика зависимости параметра шероховатости Ra от режимов шлифования и числа канавок шлифовального круга положены в основу разработанной методики проектирования шлифовальных операций и инструментальных настроек шлифовальных станков. Зона контакта абразивного круга с деталью представляет узкую полосу прямоугольной формы, движущуюся вдоль поверхности детали. Температурное поле в таком случае можно рассчитывать по схеме подвижного бесконечно долгого поверхностно-полосового источника. Разработан план, программу и аппаратное обеспечение экспериментальных исследований связей конструкторско-технологических факторов и показателей шлифовальных операций с параметрами качества шлифованных поверхностей, температурой шлифования, силовыми параметрами процесса шлифования прерывистыми шлифовальными кругами и конструктивными параметрами прерывистых шлифовальных кругов.*

**Ключевые слова:** шлифовка, температура, качество.

**Марчук В. І<sup>1</sup>., Джугурян Т.Г.<sup>2</sup>, Марчук І. В.<sup>1</sup>, Сачковська Л. О.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет

<sup>2</sup>Щецінська морська академія (Польща)

### **ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ШЛІФУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ**

*В роботі проведена серія експериментальних досліджень, що підтвердила результати моделювання температурних процесів в зоні безцентрового переривчастого шліфування заготовок кілець. Побудовані поверхні відгуку залежності параметра шорсткості Ra від режимів шліфування та числа канавок шліфувального круга покладені в основу розробленої методики проектування шліфувальних операцій і інструментальних налагоджень шліфувальних верстатів. Зона контакту абразивного круга з деталлю представляє вузьку смужку прямокутної форми, що рухається вздовж поверхні деталі. Температурне поле в такому випадку можна розраховувати за схемою рухливого нескінченно довгого поверхнево-смугового джерела. Розроблено план, програму та апаратне забезпечення експериментальних досліджень зв'язків конструкторсько-технологічних чинників та показників шліфувальних операцій з параметрами якості шліфованих поверхонь, температурою шліфування, силовими параметрами процесу шліфування переривчастими шліфувальними кругами та конструктивними параметрами переривчастих шліфувальних кругів.*

**Ключові слова:** шліфування, температура, якість.

УДК 519.23+519.25

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-9><sup>1</sup>М.А. Подригало, <sup>1</sup>В.І. Вербицький, <sup>2</sup>А.І. Коробко, <sup>1</sup>В.Ю. Байдала<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет<sup>2</sup>Український науково-дослідний інститут прогнозування і випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого, Харківська філія

### ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЩО ОТРИМАНІ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ (в порядку обговорення)

**Анотація.** В статті запропоновано новий спосіб оцінювання збігу теоретичних і експериментальних даних на основі методів математичної статистики, використовуючи в якості показника ймовірність з якою співпадають теоретичні і експериментальні дані (probability coincidence). Указаний показник засновано на припущенні того, що теоретичні і експериментальні дані розподілені нормально, а теоретичний розподіл змінюється в межах невизначеності (абсолютної похибки) вимірювання досліджуваного параметру. Мета статті підвищення точності оцінювання відповідності (адекватності) теоретичних моделей експериментальним даним. Розроблений показник дозволяє провести кількісне оцінювання адекватності математичної моделі даним експерименту. Указаний показник враховує величину невизначеності (абсолютної похибки) вимірювання показників, що входять у математичну модель. Фізична суть запропонованого показника – ймовірність з якою теоретичний розподіл співпадає з експериментальним.

**Ключові слова:** збіг результатів, теоретичне дослідження, експериментальне дослідження, ймовірність, вимірювання.

**Вступ.** Оцінювання адекватності (достовірності) результатів наукових досліджень здійснюється не лише за відповідністю методів теоретичного аналізу і проведення експериментів сучасному рівню, а також і за адекватністю результатів, що отримані різними методами.

В статті запропоновано новий спосіб оцінювання збігу даних, що отримані різними методами на основі методів математичної статистики.

Питанню дослідження збігу теоретичних і експериментальних розподілу присвячено значна кількість робіт, як фундаментальних посібників по теорії ймовірності та теорії експерименту [1, 2, 3], так і публікації по вирішенню окремих приватних задач [4, 5, 6]. Проте, слід відмітити, що до сьогодення дня у відомій літературі немає єдиного підходу до термінів і визначень з цього питання [7]. У зв'язку з цим виникають розбіжності у трактуванні окремих понять.

Детальний аналіз показників і критеріїв для встановлення відповідності теоретичного розподілу експериментальному здійснено у роботі [8]. Ці показники мають назву «критерії погодження». Це критерії Пірсона  $\chi^2$ , Колмогорова-Смірнова, Крамера-фон Мізера-Смірнова, Андерсена-Дарлігна, Купера і інші. Також, для перевірки адекватності математичної моделі даним експерименту застосовують критерій на основі співставлення дисперсії відтворюваності середнього значення функції відгуку і дисперсії адекватності [9].

Крім сказаного, у роботі [10] запропоновано універсальну функцію густини ймовірності. Проте вона є досить складною практичного застосування. У роботі [11] для вирішення задачі підвищення точності прогнозування надійності запропоновано показник за яким аналізується тільки та ділянка емпіричної кривої, що характеризує кількість бракованих деталей, тобто кінець гілки.

Кожний із розглянутих критеріїв має свою сферу застосування. Проте, в якості спільного недоліку можна виділити те, що вони потребують необхідності наявності великої вибірки (від 50, а в окремих випадках від 300 спостережень). Існуючі критерії не в повній мірі дають відповідь на питання щодо того, на скільки у кількісному виді співпадають теоретичні і експериментальні дані. Також до недоліку можна віднести те, що існуючі критерії враховують метрологічні характеристики вимірювань інтегрально, тобто при оцінюванні збігу розподілів окремо не розглядається невизначеність або похибка з якою проводяться вимірювання.

У роботі [12] автори запропонували новий спосіб оцінювання збігу теоретичних і експериментальних даних на основі методів математичної статистики, використовуючи в якості

показника ймовірність з якою співпадають теоретичні і експериментальні дані. Указаний показник засновано на припущенні того, що теоретичні і експериментальні дані розподілені нормально, а теоретичний розподіл змінюється в межах невизначеності вимірювання досліджуваного параметру. Проте ця робота має ряд недоліків, а саме не до кінця обґрунтовано механізм математичного переходу від розподілу композицій законів розподілу теоретичного і експериментального дослідження до ймовірності їх співпадіння. Також в [12] не досить детально наведено обґрунтування виведення указанного показника

**Метою статті** є обґрунтування методу оцінювання адекватності (співставлення) наукових результатів, що отримані різними методами. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачу розробки показника і критерію адекватності наукових результатів, що отримані різними методами на основі ймовірності їх сумісного прояву.

**Результати дослідження.** Філософське твердження про те, що практика це критерій істини, призвело до того, що обов'язковим етапом наукових досліджень з природничих і технічних наук є експеримент. Але обмежуватись лише експериментальними дослідженнями не слід, оскільки наукові результати вимагають їх узагальнення на інші об'єкти (інші параметри машини, машини, що мають таку ж модель функціонування, тощо). Крім цього, експериментальні дослідження можуть давати більш високу, у порівнянні з теоретичною, похибку результатів, що обумовлена недостатньою точністю вимірювань. Крім цього, результати експериментальних досліджень, що отримані різними методами можуть відрізнятись між собою (наприклад через використання засобів вимірювальної техніки різної точності, різних методик, тощо). З іншого боку, теоретична (як правило, математична) модель будується з урахуванням значної кількості спрощень і допущень, оскільки отримати істинний опис фізичної сутності об'єкту з урахуванням усіх факторів не можливо.

На наш погляд, оцінювання адекватності можна здійснювати шляхом порівняння між собою як результатів теоретичних досліджень, що отримані різними методами, так і результатів експериментальних досліджень, що отримані також різними методами.

При проведенні експериментальних досліджень точність вимірювання фізичних величин, що нас цікавлять, визначається (в залежності від прийнятої моделі оцінювання точності) середнім квадратичним відхиленням вимірюваних або розрахованих величин від їх математичних очікувань або невизначеністю вимірювання.

Розвиток комп'ютерних технологій дозволив підвищити не лише точність теоретичних досліджень, а і точність результатів експерименту за рахунок автоматизації їх отримання і оброблення. Проте, слід сказати, що точність експериментальних досліджень нижче ніж теоретичних, і вона повинна визначати точність математичних моделей в теоретичній частині досліджень. Для оцінювання адекватності результатів наукових досліджень досить часто використовуються методи кореляційного аналізу (з використанням кореляційного моменту, коефіцієнту кореляції, кореляційних функцій, тощо).

Нехай дослідження одного параметру проводяться методами: Метод 1 і Метод 2. Надалі цифрами 1 і 2 в формулах будуть позначені результати отримані за Методом 1 і Методом 2, відповідно.

Розглядаючи масив значень величин, що отримані Методом 1 і масив значень, що отримані Методом 2, як дві незалежні випадкові величини, необхідно визначати ймовірність їх сумісного прояву, що буде являтись критерієм адекватності (співставності) результатів.

Сумісна густина розподілу двох незалежних випадкових величин може бути визначена у відповідності з теоремою множення ймовірності наступним чином

$$f(x_1; x_2) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2), \quad (1)$$

де  $x_1, x_2$  – значення випадкових величин  $X_1$  і  $X_2$ , що отримані Методом 1 і Методом 2;  $x_1 \in X_1$ ,  $x_2 \in X_2$

де  $f(x_1), f(x_2)$  – густина розподілу випадкових величин  $X_1$  і  $X_2$ .

Інтегральна функція спільного розподілу результатів, що отримані Методом 1 і Методом 2, має вигляд

$$F(x_1; x_2) = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} f(x_1; x_2) dx_1 dx_2 = \int_{-\infty}^{x_1} f_1(x) dx \int_{-\infty}^{x_2} f_2(x) dx, \quad (2)$$

Ймовірність співпадіння результатів визначається подвійним інтегралом



$$\iint_L f(x_1; x_2) dx_1 dx_2, \quad (3)$$

де  $L$  – множина  $\{(x_1; x_2)|_{x_1=x_2}\}$ , тобто бісектриса I-III координатних кутів. Будь-який інтеграл за множиною нульової міри дорівнює нулю. Тим паче, співпадіння результатів в межах числових значень  $[X_{\min}; X_{\max}]$  теж має нульову ймовірність.

Отримані результати свідчать про те, що точне числове співпадіння результатів досліджень, що отримані різними методами, неможливе. Це обумовлено безкінечно великою кількістю числових значень випадкових величин як в інтервалі  $(-\infty; +\infty)$ , так і в кінцевому інтервалі  $[X_{\min}; X_{\max}]$ . У зв'язку з цим, пропонується критерій оцінювання адекватності результатів отриманих різними методами у виді

$$p = \frac{F_1(X_{\max}) - F_1(X_{\min})}{F_2(X_{\max}) - F_2(X_{\min})}, \quad (4)$$

За  $p=1$  маємо ідеальний випадок співпадіння результатів. За  $p=0$  теоретичні результати некоректні. Звужуючи межі інтервалу  $[X_{\min}; X_{\max}]$ , при знаходженні математичних очікувань теоретичних і експериментальних даних в його межах, ми тим самим підвищуємо точність оцінювання адекватності.

У рівнянні (4)

$$F_1(X_{\max}) = \int_0^{X_{\max}} f_1(x_1) dx, \quad (5)$$

$$F_1(X_{\min}) = \int_0^{X_{\min}} f_1(x_1) dx, \quad (6)$$

$$F_2(X_{\max}) = \int_0^{X_{\max}} f_2(x_2) dx, \quad (7)$$

$$F_2(X_{\min}) = \int_0^{X_{\min}} f_2(x_2) dx, \quad (8)$$

За нормального закону розподілу випадкових величин доцільно скористатись таблицею нормованого центрованого розподілу, що наведені у відомій літературі. Квантиль нормованого центрованого нормального розподілу

$$(U_{p1})_{\max} = \frac{X_{\max} - m_{x1}}{\sigma_1}, \quad (9)$$

$$(U_{p1})_{\min} = \frac{X_{\min} - m_{x1}}{\sigma_1}, \quad (10)$$

$$(U_{p2})_{\max} = \frac{X_{\max} - m_{x2}}{\sigma_2}, \quad (11)$$

$$(U_{p2})_{\min} = \frac{X_{\min} - m_{x2}}{\sigma_2}, \quad (12)$$

де  $m_{x1}, m_{x2}$  – математичне очікування результатів теоретичних і експериментальних даних.

У загальному виді отримуємо інтеграл Лапласа

$$F(x) = 1 - Q(x), \quad (13)$$

де  $Q(x)$  – результат взятий з таблиці нормованого центрованого розподілу.

**Висновки.** Результати проведеного дослідження свідчать про те, що отримати точне числове значення співпадіння результатів досліджень, що отримані різними методами, неможливо. Це обумовлено безкінечно великою кількістю числових значень випадкових величин як в інтервалі  $(-\infty; +\infty)$ , так і в кінцевому інтервалі  $[X_{\min}; X_{\max}]$ . У зв'язку з цим, запропоновано критерій оцінювання адекватності результатів отриманих різними методами, який рівняється відношенню різниць інтегральних функцій ймовірності за максимального і мінімального значення результату вимірювання.

Подальшого дослідження потребують питання аналізування потужності запропонованого показника і розповсюдження його на методіку співставлення результатів вимірювання отриманих різними експериментальними методами.

#### Список використаних джерел

1. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа хи-квадрат : Р 50.1.033-2001. [Дата введения 2002-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 87 с. (Рекомендации).
2. Налимов В. В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 208 с.
3. Надежность и эффективность в технике. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания. – М. : Машиностроение, 1989. – 320 с.
4. Greenwood, P. E., Nikulin, M. S. (1996). A guide to chi-squared testing. New York : John Wiley & Sons, 280 p.
5. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11. – № 2 (34). – С. 96-111.
6. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. II. Проверка сложных гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11. – № 4 (36). – С. 78-93.
7. Фундаментальные проблемы теории точности / [Под ред. В. П. Булатова, И. Г. Фридлиндера]. – СПб. : Наука, 2001. – 504 с.
8. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Монография. / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.
9. Славутский Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента. Учебное пособие / Л. А. Славутский. – Чебоксары : Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.
10. Булатов В. П. Расчет точности машин и приборов / В. П. Булатов, И. Г. Фридлиндер, А. П. Баталов и др. [Под общ. ред. В. П. Булатова и И. Г. Фридлиндера]. – СПб. : Политехника, 1993. – 495 с.
11. Басова Е. В. Новый аппарат оценки согласия эмпирического и теоретических распределений / Басова Е. В., Копылов Л. В., Петухов С. Л. // ААИ Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : 77-я Международная научно-техническая конференция МАМИ, 27-28 марта 2012 г. : материалы. – Москва, 2012. – С. 9-19.
12. Коробко А. Новий спосіб оцінювання збігу результатів теоретичних і експериментальних досліджень / М. Подригало, О. Ісакова, А. Коробко // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – 2017. – № 5 (67). – С. 48–51.

<sup>1</sup>М.А. Подригало, <sup>1</sup>В.И. Вербицкий, <sup>2</sup>А.И. Коробко, <sup>1</sup>В.Ю. Байдала

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский институт прогнозирования и испытаний техники и технологий для сельскохозяйственного производства имени Леонида Погорелого, Харьковский филиал

#### ОЦЕНИВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ (в порядке обсуждения)

*В статье предложен новый способ оценки совпадения теоретических и экспериментальных данных на основе методов математической статистики, используя в качестве показателя вероятность с которой совпадают теоретические и экспериментальные данные (probability coincidence). Указанный показатель основан на предположении того, что теоретические и экспериментальные данные распределены нормально, а теоретическое распределение изменяется в пределах неопределенности (абсолютной погрешности) измерения*

исследуемого параметра. Цель статьи – повышение точности оценки соответствия (адекватности) теоретических моделей экспериментальным данным. Разработанный показатель позволяет количественно оценить адекватность математической модели данным эксперимента. Он учитывает величину неопределенности (абсолютной погрешности) измерения показателей, входящих в математическую модель. Физическая суть предложенного показателя – вероятность, с которой теоретическое распределение совпадает с экспериментальным.

**Ключевые слова:** совпадение результатов, теоретическое исследование, экспериментальное исследование, вероятность, измерение.

<sup>1</sup>M. Podrigalo, <sup>1</sup>V. Verbitskiy, <sup>2</sup>A. Korobko, <sup>1</sup>V. Baidala

<sup>1</sup>Kharkiv national automobile and highway University

<sup>2</sup>“Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production”, Kharkiv branch

### RESEARCHES OBTAINED BY DIFFERENT METHODS AND THEIR ASSESSMENT OF ADEQUACY (in order of discussion)

*The article on the basis of mathematical statistical methods, proposed the whole new way of estimation of coincidence for theoretical and experimental data. The probability of coincidence of theoretical and experimental data used for the indicator (probability coincidence). Theoretical and experimental data is normally distributed, it is simplifying for the indicator. Simplifying assumption that the theoretical distribution varies of uncertainty (of absolute error) of the investigated parameter. The article aims at improving the accuracy of estimates of compliance (adequacy) of data models theoretical and experimental. An indicator that is developed provides an opportunity to assess the adequacy of the mathematical model to the data of the experiment quantitatively. It takes into account the magnitude of the uncertainty (absolute error) metrics that are included in the mathematical model. The physical essence of the proposed measure is the probability with which the theoretical distribution is consistent with the experimental distribution. References – 11.*

**Keywords:** coincidence of results, theoretical research, experimental research, probability, measurement.

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-10>

Полянский В. И., к. т. н.

ООО «Империя металлов», г. Харьков

### КОНЦЕПЦИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

*Теоретически определены условия повышения точности обработки отверстий при использовании мерных и немерных лезвийных инструментов и при шлифовании. Показано, что при обработке отверстий с неравномерно снимаемым припуском осевыми инструментами образуются упругие перемещения, снижающие точность обработки. Поэтому обработку отверстий в несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Показано, что основным параметром, определяющим погрешность обработки, является несоосность осевого инструмента и обрабатываемого отверстия. Теоретически установлено, что при обработке отверстий мерными инструментами, например, при растачивании, гораздо проще обеспечить требуемую точность, чем при обработке осевым инструментом. Для этого необходимо увеличивать скорость резания и уменьшать подачу и глубину резания и применять высокоэффективные режущие инструменты из СТМ. При расфрезеровывании отверстия можно достичь еще большего повышения точности его обработки. Показано, что основным условием высокоточной обработки при внутреннем шлифовании является снижение энергоемкости процесса резания за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания.*

**Ключевые слова:** *рассверливание отверстия, растачивание, внутреннее шлифование, упругое перемещение, точность обработки, производительность обработки*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** Обеспечение высокоточной обработки отверстий в деталях машин является важным условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит разработке эффективных технологических процессов финишной лезвийной и абразивной обработки отверстий. Наряду с повышением точности обработки, они должны обеспечивать и высокие показатели производительности и качества (бездефектность, уменьшение шероховатости обработанной поверхности и т.д.). В связи с этим возникает необходимость проведения теоретического анализа показателей точности лезвийной и абразивной обработки отверстий и выявления условия их повышения. Это позволит научно обоснованно подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной лезвийной и абразивной обработки отверстий, обеспечивающих высокие показатели точности, качества и производительности обработки. В особой мере это относится к технологическим процессам рассверливания и расфрезеровывания отверстий, внутреннего шлифования. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам обеспечения точности механической обработки отверстий в научно-технической литературе постоянно уделяется значительное внимание. В работах [1 – 4] рассмотрены общие подходы к определению условий повышения точности обработки отверстий лезвийными и абразивными инструментами. Показано, что вследствие неравномерности снимаемого припуска и возникающих упругих перемещений в технологической системе сложно при финишной обработке отверстий добиться требуемой точности. В работах [5 – 7] приведены теоретические решения по исправлению погрешности обработки отверстий для конкретных условий резания лезвийными инструментами и шлифования. Однако, для более полного представления о технологических возможностях повышения точности обработки отверстий необходимо располагать обобщенными теоретическими решениями, охватывающими все основные методы механической обработки отверстий. Для этого необходимо с единых позиций аналитически описать возникающие при абразивной и лезвийной обработке погрешности отверстий и на их основе определить пути их уменьшения.

**Цель работы** – теоретический анализ путей повышения точности обработки отверстий в деталях машин при их лезвийной обработке и при шлифовании.

**Матеріали досліджень.** Традиційно фінішну обробку отверстий виробляють мерними і немерними режущими інструментами. В останні роки отримав також застосування високоефективний метод расфрезеровування отверстий на сучасних металорежущих станках з ЧПУ типу «оброблювальний центр», який дозволяє суттєво підвищити точність і продуктивність обробки. Основним недоліком обробки мерними осевими інструментами (сверлами, зенкерами, развертками) є перевищення діаметра обробленого отверстия діаметра інструмента в зв'язі з нерівномірністю снимаемого припуску і виникаючими упругими переміщеннями в технологічній системі, що, природно, знижує точність оброблюваного отверстия (точності його розміра і форми). При обробці немерним інструментом (при растачивании отверстия резцом), навпаки, діаметр обробленого отверстия, як правило, менше заданого діаметра внаслідок виникаючих в технологічній системі упругих переміщень. Тому важливо теоретично встановити закономірності формування погрешностей обробки в двох розглянутих випадках.

На рис. 1 представлена розрахункова схема визначення величини упругого переміщення (деформування) сверла при расверливанні отверстия за один проход  $\Delta_1$ , коли осі сверла з центром  $O$  і оброблюваного отверстия з центром  $O_0$  не співпадають на величину  $\Delta_0$  [6]:

$$\Delta_1 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_0}{K_{рез} \cdot c}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_z / P_y$ ;  $P_z, P_y$  – тангенціальна і радіальна складові сили різання, діючі на лезві сверла, Н;  $S$  – подача, м/об.;  $c$  – приведена жорсткість сверла в радіальному напрямку, Н/м;  $\varphi$  – половина подвійного кута в плані сверла;  $\Delta_0$  – величина несоосности сверла і оброблюваного отверстия, м.

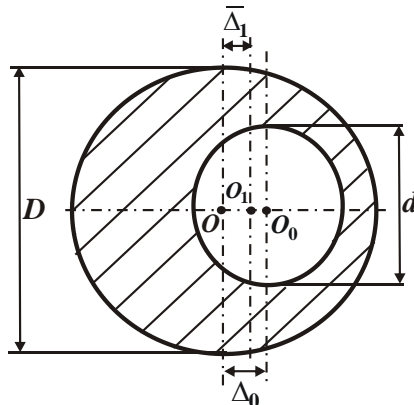


Рис. 1. Розрахункова схема визначення величини упругого переміщення сверла при расверливанні отверстия з початковим діаметром  $d$

На другому проході сверла величина його упругого деформування  $\Delta_2$  визначається цією ж залежністю (1), розглядаючи в ній замість величини  $\Delta_0$  величину  $\Delta_1$ :

$$\Delta_2 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_1}{K_{рез} \cdot c} = \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^2 \cdot \Delta_0. \quad (2)$$

Аналогічно описується величина упругої деформації сверла на третьому і на всіх наступуючих  $n$  проходах:

$$\Delta_3 = \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^3 \cdot \Delta_0; \quad (3)$$

$$\Delta_n = \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^n \cdot \Delta_0; \quad (4)$$

Отношение  $\Delta_0 / \Delta_n$  определяет суммарное уточнение  $\varepsilon_{сум}$  [2]:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{\Delta_n} = \left( \frac{K_{рез} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^n. \quad (5)$$

Соответственно уточнение на проходе  $\varepsilon$  равно:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_0}{\Delta_1} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\Delta_2}{\Delta_3} = \dots = \frac{\Delta_{n-1}}{\Delta_n} = \frac{K_{рез} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}. \quad (6)$$

Поскольку  $\varepsilon > 1$ , то отношение  $\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} < 1$ . Следовательно, с каждым последующим проходом сверла величина его упругой деформации будет уменьшаться  $\Delta_n \rightarrow 0$ , что обеспечит достижение заданной точности обрабатываемого отверстия.

Необходимо обратить внимание на то, что если обработка на первом проходе будет производиться сверлом с диаметром, равным заданному диаметру обрабатываемого отверстия, то это приведет к образованию погрешности обработки отверстия величиной  $\Delta_0$ . Причем, устранить эту погрешность на последующих проходах сверла невозможно. Поэтому обработку отверстий за несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Аналогично устанавливаются диаметры зенкеров и разверток при обработке отверстий за несколько проходов, обеспечивая, таким образом, заданную точность обрабатываемого отверстия.

При растачивании отверстия резцом с неравномерно снимаемым припуском, т.е. при его обработке немерным инструментом, диаметр обрабатываемого отверстия формируется лишь за счет уменьшения величины упругого перемещения резца или детали, тогда как в предыдущем случае (при рассверливании отверстия) диаметр отверстия определялся суммой диаметра сверла и его упругого перемещения. Следовательно, при растачивании отверстия значительно проще добиться требуемой точности его обработки, чем при рассверливании. Для этого достаточно управлять лишь величиной упругого перемещения резца. Так, при первом проходе резца величина его упругого перемещения  $y_1$  в радиальном направлении, исходя из соотношений [4]:

$$y_1 = \frac{P_{y1}}{c} = \frac{P_{z1} \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t - y_1) \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c}, \quad \text{равна:}$$

$$y_1 = \frac{t}{\left( 1 + \frac{K_{рез} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (7)$$

где  $P_{y1}$ ,  $P_{z1}$  – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при первом проходе, Н;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $\varphi$  – главный угол резца в плане;  $K_{рез} = P_{z1} / P_{y1}$ ;  $S$  – подача, м/об.;  $t$  – глубина резания, м.

Уменьшить величину  $y_1$  можно увеличением второго слагаемого, стоящего в знаменателе. При втором проходе сверла величина его упругого перемещения  $y_2$  определяется:

$$y_2 = \frac{(t + y_1)}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}. \quad (8)$$

При  $n$ -ом проході маємо:

$$y_n = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} + \dots + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (9)$$

Характер зміни величини  $y_n$  підчиняється геометричній прогресії, тоді [8]:

$$y_n = y_1 \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{-n})}{(1 - \varepsilon)} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{pez} \cdot c} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}) = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{K_{pez} \cdot c \cdot V} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad (10)$$

де  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  – уточнення на проході;  $Q = S \cdot t \cdot V$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с.

Виходячи з залежності (10) зменшити величину  $y_n$  при заданій продуктивності обробки  $Q = S \cdot t \cdot V$  можна шляхом збільшення швидкості різання  $V$ , пропорційно зменшив подачу  $S$  або глибину різання  $t$ . При цьому з зменшенням подачі  $S$  збільшується уточнення на проході  $\varepsilon$ , зменшується величина  $\varepsilon^{-n}$  і збільшується множник  $(1 - \varepsilon^{-n})$ , що не дозволяє пропорційно зменшувати величину  $y_n$  з збільшенням швидкості різання  $V$ .

Зменшення глибини різання  $t$  при заданому значенні снимаемого припуску  $\Pi$  призводить до збільшення  $n = \Pi/t$  і відповідно до зменшення величини  $\varepsilon^{-n}$  і збільшення множника  $(1 - \varepsilon^{-n})$ , а це призводить до збільшення величини  $y_n$ . Тому з збільшенням швидкості різання  $V$  (при пропорційному зменшенні глибини різання  $t$  і виконанні умови  $Q = const$ ) величина  $y_n$  буде зменшуватися, однак не по лінійному закону в зв'язі з збільшенням множника  $(1 - \varepsilon^{-n})$  в залежності (10).

Більш ефективним рішенням, витікаючим з залежності (10), слід розглядати можливість збільшення продуктивності обробки  $Q = S \cdot t \cdot V$  за рахунок збільшення швидкості різання  $V$ . В цьому випадку буде виконуватися умова  $y_n = const$  при незмінних значеннях подачі  $S$  і глибини різання  $t$  і збільшуваним значенням швидкості продольної подачі  $S_{прод}$ , визначеної з умови:  $\tau = \frac{S}{S_{прод}} = \frac{\pi \cdot D_{дет}}{V}$ , де  $\tau$  – час переміщення різця в продольному напрямку на величину подачі  $S$ , с;  $D_{дет}$  – діаметр деталі, м. Тоді

$$S_{прод} = \frac{S \cdot V}{\pi \cdot D_{дет}}. \quad (11)$$

Як видно, чим більше  $V$ , тим більше  $S_{прод}$ . Уточнення на проході  $\varepsilon$  залишиться незмінним, оскільки подача  $S$  в цьому випадку залишається незмінною.

Для забезпечення заданої точності обробки, виходячи з залежності (10), необхідно зменшувати відношення  $\sigma/K_{pez}$  і збільшувати жорсткість технологічної системи  $c$ . При цьому уточнення на проході  $\varepsilon$  збільшується, що призводить до зменшення величини  $\varepsilon^{-n}$  і збільшення множника  $(1 - \varepsilon^{-n})$ , однак не настільки суттєво порівняно з зменшенням  $y_n$  за рахунок лінійного зменшення відношення  $\sigma/K_{pez}$  і збільшення жорсткості

технологической системы  $c$ . В итоге величину  $U_n$  можно уменьшить до необходимого значения.

Полученные теоретические решения согласуются с практикой растачивания отверстий, где на финишных операциях, например, с применением резцов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ) обработку осуществляют с увеличенной скоростью резания  $V$  и относительно небольшими значениями подачи  $S$  или глубины резания  $t$ . Это обеспечивает повышение точности и производительности обработки. Кроме того, применение резцов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), обладающих высокой остротой и режущей способностью, позволяет уменьшить отношение  $\sigma / K_{рез}$ , что дополнительно снижает величину  $U_n$  и повышает точность обработки.

Используя зависимость (10), произведем анализ возможностей уменьшения величины  $U_n$  при внутреннем шлифовании. В этом случае угол  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$ ;  $V = V_{дет}$  и, соответственно, все закономерности, установленные для лезвийной обработки, остаются справедливыми и для внутреннего шлифования. Поэтому целесообразно увеличивать скорость детали  $V_{дет}$  при одновременном уменьшении подачи  $S$  и глубины шлифования  $t$ . Это способствует повышению точности и производительности обработки. Важно также обеспечить уменьшение отношения  $\sigma / K_{рез}$  и увеличение жесткости технологической системы  $c$ .

Как известно, при шлифовании параметр  $\sigma$  больше, чем при лезвийной обработке из-за наличия интенсивного трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Поэтому уточнение на проходе  $\varepsilon$  будет меньше, что приведет к увеличению величины  $\varepsilon^{-n}$  и уменьшению множителя  $(1 - \varepsilon^{-n})$  в зависимости (10). Это в определенной степени будет компенсировать увеличение величины  $U_n$  с увеличением параметра  $\sigma$ . Исходя из сказанного, увеличение величины  $U_n$  при внутреннем шлифовании не будет столь значительным по сравнению с лезвийной обработкой. При глубинном внутреннем шлифовании с относительно небольшой скоростью детали  $V_{дет}$  величина  $U_n$  увеличится. Следовательно, целесообразно использовать схему многопроходного внутреннего шлифования.

При расфрезеровывании отверстия величина  $U_n$  подчиняется тем же закономерностям, что и при растачивании и внутреннем шлифовании [9]. Следовательно, эффективно увеличивать скорость резания, т.е. обработку производить в условиях высокоскоростного резания. Благодаря увеличению количества одновременно работающих режущих лезвий фрезы, это позволит повысить производительность и точность обработки по сравнению с процессами растачивания и внутреннего шлифования и, тем более, по сравнению с процессом рассверливания отверстия. Таким образом показано, что с точки зрения повышения производительности и точности методы механической обработки отверстий немерными инструментами (резцами, шлифовальными кругами, фрезами) располагают большими технологическими возможностями, чем методы обработки мерными осевыми инструментами (сверлами, зенкерами, развертками).

**Выводы.** Теоретически определены условия повышения точности обработки отверстий при использовании мерных и немерных лезвийных инструментов и при шлифовании. Показано, что при обработке отверстий с неравномерно снимаемым припуском осевыми инструментами образуются упругие перемещения, снижающие точность обработки. Поэтому обработку отверстий за несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Установлено, что при обработке отверстий мерными инструментами, например, при растачивании и расфрезеровывании, гораздо проще обеспечить требуемую точность, чем при рассверливании. Показано, что основным условием высокоточной обработки при внутреннем шлифовании является снижение энергоемкости процесса резания за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо теоретически и экспериментально определить условия уменьшения



енергоємкості процесу різання, оказуючого значительне вплив на точність оброблюваного отвору при його розсверлюванні, растачиванні і внутрішньому шліфуванні.

### Информационные источники

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Маталин А. А. Технология машиностроения: учебник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. – Харьков: ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов». – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
6. Иванов И. Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения». – Мариуполь, 2008. – 21 с.
7. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов, 1979. – 232 с.
8. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
9. Полянский В. И. Расширение технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий // Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – №11 (2). – С. 87-92.

**Полянський В. І., к.т.н.**

ТОВ «Імперія металів», м. Харків

### КОНЦЕПЦІЇ ВИСОКОТочної МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

*Теоретично визначено умови підвищення точності обробки отворів при використанні мірних і немірних лезових інструментів і при шліфуванні. Показано, що при обробці отворів з нерівномірно знімаємим припуском осьовими інструментами утворюються пружні переміщення, що знижують точність обробки. Тому обробку отворів в кілька проходів доцільно здійснювати свердлами з різними діаметрами, збільшуючи діаметр від проходу до проходу. Показано, що основним параметром, що визначає похибку обробки, є неспіввідношення осьового інструменту і оброблюваного отвору. Теоретично встановлено, що при обробці отворів мірними інструментами, наприклад, при розточуванні, набагато простіше забезпечити необхідну точність, ніж при обробці осьовим інструментом. Для цього необхідно збільшувати швидкість різання і зменшувати подачу і глибину різання та застосовувати високоефективні різальні інструменти з СНМ. При розфрезеруванні отвору можна досягти ще більшого підвищення точності його обробки. Показано, що основною умовою високоточної обробки при внутрішньому шліфуванні є зниження енергоємності процесу різання за рахунок зменшення інтенсивності тертя в зоні різання.*

**Ключові слова:** розсверлювання отвору, розточування, внутрішнє шліфування, пружне переміщення, точність обробки, продуктивність обробки

**Polyansky V. I., Ph.D.**

LLC "Empire of metals", Kharkiv

### CONCEPTS OF HIGH-PRECISION MECHANICAL MACHINING OF OPENINGS IN MACHINE PARTS

*Theoretically, the conditions for increasing the accuracy of hole machining when using dimensional and non-dimensional blade tools and during grinding are theoretically determined. It is shown that when machining holes with uneven allowance with axial tools, elastic displacements are formed that reduce the accuracy of the machining. Therefore, it is advisable to process holes in several passes with drills with different diameters, increasing the diameter from the passage to the*

*passage. It is shown that the main parameter determining the processing error is the misalignment of the axial tool and the machined hole. It has been theoretically established that when machining holes with measuring tools, for example, during boring, it is much easier to provide the required accuracy than when machining with an axial tool. To do this, it is necessary to increase the cutting speed and reduce the feed and depth of cut and apply high-performance cutting tools from STM. When milling holes, you can achieve even greater increase in the accuracy of its processing. It is shown that the main condition for high-precision machining during internal grinding is to reduce the energy intensity of the cutting process by reducing the friction intensity in the cutting zone.*

**Key words:** *hole drilling, boring, internal grinding, elastic displacement, machining accuracy, machining productivity*

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-11>Сергеев А. С.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>, д.т.н., Шкурупий В. Г.<sup>2</sup>, к.т.н.<sup>1</sup>ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина<sup>2</sup>Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, г. Харьков, Украина

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Приведены новые аналитические зависимости, определяющие высотные параметры шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен. Показано, что чем больше длина площадки износа на режущем зерне (имитирующая геометрическую форму режущей части зерна), тем меньше параметры шероховатости поверхности  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ , которое может увеличиваться до значений 30 и более. Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при абразивном полировании, характеризующимся фактически одновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Установлено, что при больших значениях отношения  $R_{max}/R_a$  наблюдается тенденция перехода процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала. При шлифовании вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально, в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги с фактически одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

**Ключевые слова:** шлифование, абразивное полирование, процесс резания, шероховатость поверхности, режущее зерно, поперечная подача

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** В современном производстве при изготовлении высокоточных деталей машин, по-прежнему, чрезвычайно острой является проблема обеспечения требуемых высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Несмотря на имеющийся большой арсенал возможных методов абразивной обработки, обеспечивающих существенное уменьшение высот микронеровностей на обрабатываемых поверхностях, их применение на практике не всегда эффективно. Основной причиной является низкая производительность обработки на финишных операциях доводки и абразивного полирования. Поэтому получили применение комбинированные методы финишной абразивной обработки, удачно сочетающие эффекты доводки свободным абразивом и шлифования. Например, использование шлифовальных кругов фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки позволяет существенно уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях при достаточно высокой производительности обработки. Для определения оптимальных условий обработки с использованием этих методов необходимо разработать математические модели формирования шероховатости поверхности и обосновать условия ее уменьшения. Их практическое применение станет важным фактором повышения эффективности абразивной обработки на основе критерия наименьшей шероховатости обрабатываемой поверхности.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В научно-технической литературе приведены расчетные схемы определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, позволяющие производить анализ и расчет параметров шероховатости поверхности и на этой основе выбирать оптимальные условия обработки [1–5]. Весьма эффективен разработанный теоретико-вероятностный подход к определению шероховатости поверхности при шлифовании [2, 3]. Однако, используя его, сложно определить параметры шероховатости поверхности с учетом изменения формы режущей части зерен, например, в связи с их износом. Поэтому актуальной является задача аналитического определения параметров шероховатости поверхности и условий их уменьшения с учетом износа режущих зерен и образования на них площадок износа. Установленные более глубокие знания закономерностей формирования шероховатости обрабатываемой поверхности позволяют научно

© Сергеев А. С.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>, д.т.н., Шкурупий В. Г.<sup>2</sup>, к.т.н.

обоснованно подходить к определению условий повышения эффективности финишной абразивной обработки.

**Цель работы** – аналитическое описание параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке и определение условий их уменьшения.

**Материалы исследований.** Для обобщенного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке рассмотрим упрощенный теоретический подход к расчету параметров шероховатости поверхности. Предположим, что обработка производится режущими зёрнами конусообразной формы одинаковой высоты с углом при вершине  $2\gamma$ . При их наложении на диаметрально расположенную плоскость (имитирующую обрабатываемый образец) образуется режущий профиль с равноудаленными проекциями вершин зёрен (рис. 1,а). Относительная полнота этого профиля  $\varepsilon(y)$  и противоположная функция  $\Phi(y)=1-\varepsilon(y)$  описываются прямыми линиями на этом же рисунке. Следовательно, величина  $a$ , определяющая положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности, равна  $a=0,5 \cdot v$  (рис. 1,а), а параметр шероховатости поверхности  $R_a=0,25 \cdot v$ , где  $v$  – высота выступания вершин неизношенных зёрен над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента, м. Это вытекает из условия:  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где

$F_1 = \frac{1}{8} \cdot v \cdot 1$  – площадь треугольника. Отсюда вытекает отношение:  $v/R_a = 4$  или с учетом условия  $v = R_{max}$  имеем:  $R_{max}/R_a = 4$ . Полученное теоретически значение отношения  $R_{max}/R_a = 4$  согласуется с известными экспериментальными данными [6], полученными при шлифовании.

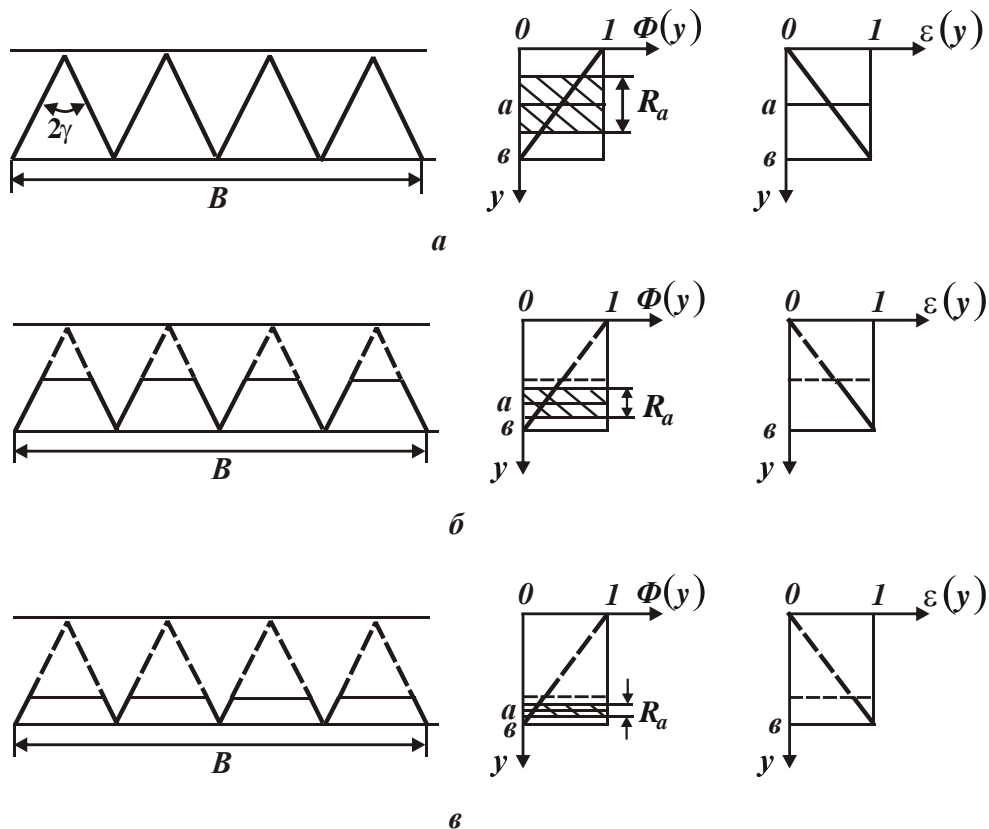


Рис. 1. Расчетная схема параметров шероховатости поверхности

Рассмотрим случай абразивной обработки режущими зёрнами одинаковой высоты с образованными на их вершинах площадками износа одинаковой длины  $x_1 = 0,5 \cdot \text{tg} \gamma \cdot v$  (рис. 1,б), которые имитируют геометрическую форму режущей части зёрна. В этом случае функции  $\varepsilon(y)$  и  $\Phi(y)$  имеют вид, показанный сплошной линией на рис. 1, б. Очевидно, величина

$a = 0,75 \cdot \epsilon$ , а параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ . Соответственно, отношение  $\epsilon / R_a = 16$  или с учетом условия  $\epsilon = 2 \cdot R_{max}$  принимает значение  $R_{max} / R_a = 8$ .

Как видно, с образованием на режущих зернах площадок износа отношение  $R_{max} / R_a$  увеличилось до значения, которое нетипично для процесса шлифования, однако имеет место при абразивном полировании. Так, в работе [7] показано, что при абразивном полировании (рис. 2) экспериментально установленное значение  $R_{max} / R_a = 30$ , т.е. это значение еще больше превышает теоретически установленное значение, равное  $R_{max} / R_a = 8$ .

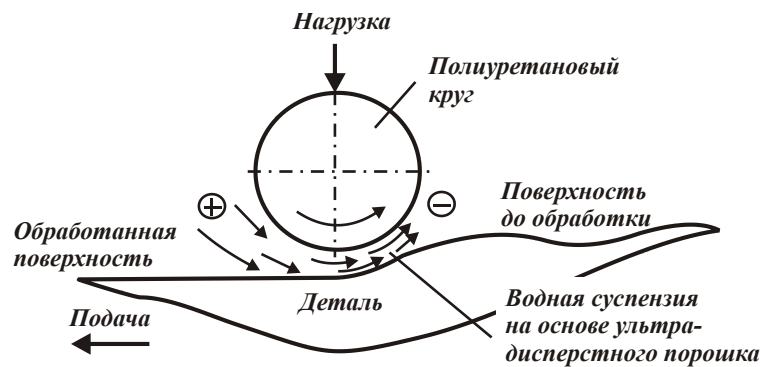


Рис. 2. Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка

Производя аналогично расчеты параметра шероховатости поверхности  $R_a$  при абразивной обработке режущими зернами с еще большими длинами площадок износа, например, с  $x_1 = 0,25 \cdot \text{tg} \gamma \cdot \epsilon$  (рис. 1,в), из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{16} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $\epsilon / R_a = 64$ . С учетом условия  $\epsilon = 4R_{max}$  отношение  $R_{max} / R_a = 16$ . В этом случае отношение  $R_{max} / R_a$  увеличилось в 2 раза по сравнению с предыдущим случаем.

С увеличением длины площадки износа на режущем зерне до значения  $x_1 = 0,125 \cdot \text{tg} \gamma \cdot \epsilon$ , из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{64} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $\epsilon / R_a = 254$ . С учетом условия  $\epsilon = 8 \cdot R_{max}$  отношение  $R_{max} / R_a = 32$ . Как видно, теоретически установленное значение отношение  $R_{max} / R_a$  примерно совпадает с экспериментально установленным значением, равным  $R_{max} / R_a = 30$ . Это указывает на то, что длина площадки износа на режущих зернах оказывает значительное влияние на отношение  $R_{max} / R_a$ . Следовательно, добиться уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  можно за счет создания на режущих зернах площадок износа, т.е. создания так называемых «плосковершинных» зерен [6], или применения овализированных абразивных зерен [7].

Необходимо отметить, что приведенные результаты расчетов справедливы при обработке абразивным инструментом без поперечной подачи. В противном случае закономерности формирования шероховатости поверхности изменятся в связи с разновысотным наложением проекций зерен на диаметрально расположенную плоскость. А это приведет к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Чем значительнее поперечная подача абразивного инструмента, тем в большей мере будет проявляться разновысотное наложение проекций зерен на диаметрально плоскость и, соответственно, больше будет параметр шероховатости

поверхности  $R_a$ . Поэтому при высокопроизводительном шлифовании, несмотря на возможность образования на режущих зернах значительных площадок износа, параметр шероховатости поверхности  $R_a$  будет существенно увеличиваться. Очевидно, уменьшить его можно в условиях абразивного полирования при весьма малых значениях поперечной подачи с обеспечением достаточно высоких значений отношения  $R_{max}/R_a > 4$ .

Если рассматривать в первом приближении в качестве толщины среза режущим зерном  $a_z$  параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$ , то при абразивном полировании наблюдается тенденция перехода от процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала с абразивным зерном (без образования микростружки). Данная закономерность возможна лишь в условиях абразивного полирования, осуществляемого при фактически одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента, и с небольшой поперечной подачей. При обычном шлифовании, как отмечалось выше, такой процесс обработки неосуществим в связи с разновысотным расположением режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального абразивного круга, а также в связи с увеличенной поперечной подачей. В этом случае отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально [1,6], в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

Исходя из предложенного теоретического подхода определения отношения  $R_{max}/R_a$ , можно установить обобщенную аналитическую зависимость этого отношения. Для этого следует высоту  $\epsilon$  разбить на  $z$  одинаковых частей. Тогда площадь треугольника  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{\epsilon}{z} \cdot \frac{1}{z} \right)$ ,

а с учетом условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$  имеем:  $R_a = \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon}{z^2}$ . С учетом  $\epsilon = z \cdot R_{max}$  окончательно получено:

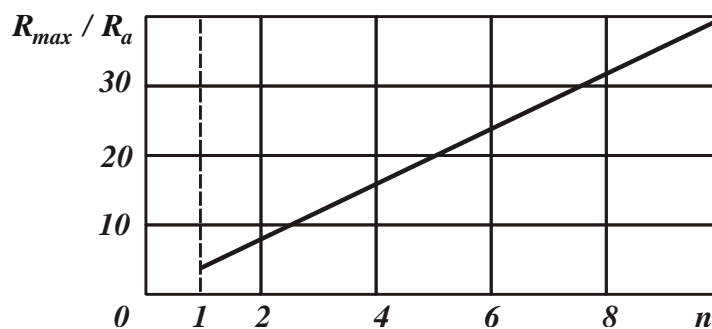
$$\frac{R_{max}}{R_a} = 4 \cdot z. \quad (1)$$

В табл. 1 и рис. 3 приведены расчетные значения отношения  $R_{max}/R_a$  в зависимости от величины  $z$ . Как видно на рис. 3, значения отношения  $R_{max}/R_a$  увеличиваются по линейной зависимости с увеличением величины  $z$ .

Таблица 1

Расчетные значения отношения  $R_{max}/R_a$ 

| $z$           | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|---------------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $R_{max}/R_a$ | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 |

Рис. 3. Зависимость отношения  $R_{max}/R_a$  от величины  $z$ 

Таким образом, по известному значению  $z$ , исходя из зависимости (1), можно определить отношение  $R_{max}/R_a$  или, наоборот, по известному значению  $R_{max}/R_a$  определить значение  $z$ .

Параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  определяется из условия:  $2 \cdot \varphi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n = B$ , где  $n$  – количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, шт. Тогда с учетом зависимости  $\varphi = z \cdot R_{max}$  имеем:

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z \cdot n}. \quad (2)$$

Как видно, основными условиями уменьшения параметра  $R_{max}$  является увеличение величины  $z$  и количества режущих зерен  $n$ .

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из зависимости (1):

$$R_a = \frac{B}{8 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z^2 \cdot n}. \quad (3)$$

Существенно уменьшить параметр  $R_a$  можно, главным образом, за счет увеличения величины  $z$ , т.е. увеличения длины площадки износа на режущем зерне  $x_1$ .

Таким образом теоретически установлено, что чем больше величина  $x_1$  и больше зерен участвует в формировании шероховатости поверхности, тем меньше параметры  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ . Это согласуется с экспериментальными данными. Используя полученные результаты расчетов, можно научно обоснованно подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки.

**Выводы.** Полученные аналитические зависимости для определения основных параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен. Показано, что чем больше длина площадки износа на режущем зерне (имитирующая геометрическую форму режущей части зерна), тем меньше параметры шероховатости поверхности  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ , которое может увеличиваться до значений 30 и более. Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при абразивном полировании, характеризующемся фактически одновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Установлено, что при больших значениях отношения  $R_{max}/R_a$  наблюдается тенденция перехода процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования микростружек. При шлифовании вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально, в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги с фактически одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования процесса абразивной обработки инструментом со связанным абразивом, у которого режущие зерна выступают из связки на одинаковую высоту. Это позволит оценить технологические возможности уменьшения шероховатости поверхности для указанных условий обработки.

#### Информационные источники

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Евсеев Д. Г., Сальников А. И. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
5. Братан С. М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового та тонкого шліфування: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Одеса, 2006. – 35 с.

6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. «Точность обработки деталей машин». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

7. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Одеса, 2006. – 21 с.

**Сергеев О. С.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>, д.т.н., Шкурупій В. Г.<sup>2</sup>, к.т.н.**

<sup>1</sup>ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ

*Наведено нові аналітичні залежності, що визначають висотні параметри шорсткості поверхні при абразивній обробці з урахуванням зносу різальних зерен. Показано, якщо більша довжина площадки зносу на різучому зерні (що імітує геометричну форму різальної частини зерна), то менше параметри шорсткості поверхні  $R_{max}$ ,  $R_a$  і більше відношення  $R_{max}/R_a$ , яке може збільшуватися до значень 30 і більше. Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при абразивному поліруванні, яке характеризується фактично одновисотним розташуванням абразивних зерен на робочій поверхні інструменту. Встановлено, що при великих значеннях відношення  $R_{max}/R_a$  спостерігається тенденція переходу процесу різання до процесів тертя і пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу. При шліфуванні внаслідок різновисотного розташування абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга відношення  $R_{max}/R_a$  менше і змінюється, як встановлено експериментально, в межах 4 ... 10. Тому на фінішних операціях слід використовувати шліфувальні круги з фактично одновисотним виступанням різальних зерен над рівнем зв'язки. Це дозволить зменшити висоти мікронерівностей на оброблених поверхнях.*

**Ключевые слова:** шліфування, абразивне полірування, процес різання, шорсткість поверхні, різальне зерно, поперечна подача

**Serhieiev O. S.<sup>1</sup>, Novikov F. V.<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Skurupy V. G.<sup>2</sup>, Ph.D**

<sup>1</sup>GVUZ «Priazovsk State Technical University», Mariupol, Ukraine

<sup>2</sup>Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

### CALCULATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS AT ABRASIVE TREATMENT

*New analytical relationships are given that determine the altitude parameters of surface roughness during abrasive machining, taking into account the wear of cutting grains. It is shown that the greater the length of the wear area on the cutting grain (simulating the geometric shape of the cutting part of the grain), the lower the surface roughness parameters  $R_{max}$ ,  $R_a$  and the greater the ratio  $R_{max}/R_a$ , which can increase to values of 30 or more. This is consistent with the known experimental data obtained by abrasive polishing, characterized in fact by a single-height arrangement of abrasive grains on the working surface of the tool. It has been established that for large values of the  $R_{max}/R_a$  ratio, a tendency is observed in the transition of the cutting process to friction and elasto-plastic deformation of the processed material. When grinding due to the uneven location of the abrasive grains on the working surface of the grinding wheel, the ratio  $R_{max}/R_a$  is less and varies, as established experimentally, within 4 ... 10. Therefore, grinding operations should be used in the finishing operations with the cutting heads protruding almost at the same height above the level of the bond. This will reduce the height of the microroughness on the machined surfaces.*

**Keywords:** grinding, abrasive polishing, cutting process, surface roughness, cutting grain, transverse feed



УДК 620.179

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-12>

О. Середюк, д.т.н., Н. Малісевич, аспірантка

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ НА ТЕХНІЧНУ РЕАЛІЗАЦІЮ МЕТОДУ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

**Анотація.** Проведено аналіз відомих нормативних методів і технічних рішень для розрахункового і експериментального методу визначення теплоти згорання природного газу. Обґрунтовано необхідність визначення теплоти згорання вологого природного газу у споживачів за місцем роботи газоспоживного обладнання. Викладено технічне рішення для реалізації запатентованого авторами способу визначення теплоти згорання природного газу прямим методом за температурою згорання газу. Кількісно оцінена зміна відносної похибки визначення теплоти згорання природного газу від вологості газу і вологості повітря для умов реалізації запропонованого способу визначення теплоти згорання для конкретних трьох проб газу з теплою згорання 7759 ккал/м<sup>3</sup>, 8145 ккал/м<sup>3</sup> та 8538 ккал/м<sup>3</sup>. Встановлені закономірності зміни відносної похибки визначення теплоти згорання від двох складових вологості. Здійснене моделювання відносної похибки визначення теплоти згорання природного газу одночасно від його вологості і вологості навколишнього повітря. Досліджено вплив конструктивних факторів, які впливають на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. Встановлено наявність суттєвого градієнта температури вздовж поверхні тонкої пластини та набагато менше її значення для грубої пластини. Досліджені динамічні характеристики нагрівання пластини і термопари при вимірюванні температури полум'я.

**Ключові слова:** природний газ, теплота згорання, вологість газу, вологість повітря, термоперетворювачі, температура полум'я.

**Актуальність задачі.** З врахуванням світової тенденції підвищення цін на енергоносії, в тому числі на природний газ, актуальним є питання забезпечення необхідної точності вимірювань з врахуванням нових сучасних концепцій до реалізації його обліку. Міжнародний досвід [1, 2] і чинний в Україні національний стандарт [3] рекомендує здійснювати облік природного газу інформаційно-вимірювальними системами, які забезпечують вимірювання не тільки використаного об'єму газу, але і враховувати при цьому його теплоту згорання. Це дозволяє здійснювати облік газу в одиницях енергії і безпосереднім чином впливати на його вартість.

З урахуванням такого підходу як доповнення до вузлів обліку природного газу переважно застосовують лабораторні хроматографи, які забезпечують розрахунковий метод визначення теплоти згорання природного газу. Проте такий метод практично неможливо реалізувати безпосередньо у споживачів, в тому числі і у населення, через значну вартість такого обладнання і практичну відсутність мобільних дешевих хроматографів. Тому актуальною є розробка нових експрес-методів визначення теплоти згорання природного газу, які могли би бути реалізовані і у споживачів газу.

Тому вивчення питання удосконалення пристроїв для вимірювання і контролю теплоти згорання природного газу є актуальною задачею наукових досліджень, яка відкриває нові шляхи раціонального і ефективного використання енергетичних ресурсів, до яких відноситься природний газ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі нормативні документи [1-3] передбачають проведення лабораторних досліджень визначення теплоти згорання природного газу в хімічних лабораторіях розрахунковим методом [4] на основі хроматографічного аналізу газу або з використанням лабораторних калориметрів [5]. Однак ці методи передбачають вимірювання теплоти згорання в лабораторних умовах тільки сухого газу.

Відоме запатентоване технічне рішення [6] передбачає застосування непрямого методу експрес-визначення теплоти згорання природного газу, який здійснюють шляхом вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у ньому. При цьому контролюється вміст в газі азоту і діоксиду вуглецю з наступним використанням математичної залежності теплоти згорання природного газу від вимірних його параметрів з використанням алгоритмів штучних

нейронних мереж. Наведений спосіб також стосується вимірювання калорійності тільки сухого газу, оскільки на даний час відсутні моделі, які би враховували вплив вологості на швидкість поширення ультразвуку в природному газі.

Спосіб визначення теплоти згорання горючих газів [7] полягає у вимірюванні температури полум'я пальника при згоранні суміші сухого досліджуваного газу з постійним об'ємним співвідношенням повітря, яке регулюється в залежності від витрати газу, який спалюється. Даний спосіб вимагає використання спеціального обладнання, яке ускладнює технічну реалізацію процесу вимірювання теплоти згорання, при якому також не передбачено врахування впливу вологи на результати вимірювання. Тут також не конкретизована методика і засоби вимірювання температури полум'я при згоранні досліджуваного газу.

Відомі дослідження щодо застосування термоанемометричного методу контролю теплоти згорання природного газу [8, 9] передбачає опосередковане врахування компонентного складу газу на вимірювання його енергії за результатами математичного моделювання [10]. Однак на даний час в моделі функціонування таких вимірювачів відсутні дослідження фактору впливу вологості природного газу на визначення його теплоти згорання.

У відомих закордонних роботах польських науковців [11, 12] здійснено аналіз видів палива, в тому числі, їх поділ з точки зору калорійності у відповідності до міжнародних стандартів ISO. В них проаналізований вплив компонентного складу газу на його теплоту згорання, однак також відсутні дослідження щодо впливу вологості газу на його калорійність.

Додамо також, що вплив наявності вологи при згоранні природного газу враховується у нормативних документах, наприклад [4], при розрахунку фізичних властивостей природного газу як різні значення вищої і нижчої теплоти згорання природного газу. При цьому враховується розрахунковим методом вплив вологи (водяної пари), яка утворюється при згоранні природного газу і не враховується можлива наявність в ньому як окремого компонента водяної пари.

Однак, як відомо, при реальних умовах згорання природного газу можуть виникнути ще додаткові дестабілізуючі фактори, які безпосередньо впливають на теплоту згорання газу. Першим є вологість газу, вміст якої кількісно визначається, наприклад, температурою точки роси [5], бо газ не може бути абсолютно сухим. Другим фактором є волога, яка знаходиться в навколишньому середовищі (повітрі), яке використовується для спалювання газу. Ці два додаткових фактори в кінцевому результаті зменшують енергію газу, яка отримується при його спалюванні.

Таким чином потребують розроблення пристрої, які би могли контролювати теплоту згорання реального природного газу методом експрес-контролю безпосередньо у споживачів.

Метою роботи є дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу.

**Викладення основного матеріалу.** За участю авторів запропонований новий спосіб для експрес-визначення теплоти згорання природного газу [13], який базується на вимірюванні температури спалюваного у пальнику газу. При реалізації способу забезпечується згорання суміші постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням у конструкції пальника інжекторного забірною пристрою навколишнього повітря і проградуїрованого по витраті торцевого звужувального пристрою, через який здійснюється витік газу в пальнику при його спалюванні.

Особливістю застосування вказаного нового способу є можливість визначати теплоту згорання не тільки сухих, але і вологих газів, а також газів, які містять різні неспалювані домішки або домішки, при згоранні яких знижується теплота згорання досліджуваного газу. Запропонований спосіб при реалізації передбачає попереднє калібрування пальника, на якому здійснюють спалювання газу щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, як функцію від робочих параметрів згорання газу. Такий підхід щодо застосування калібрування забезпечує можливість проведення експрес-визначення теплоти згорання практично за будь-яких умов навколишнього середовища і за вимірних значень параметрів природного газу (тиск, температура, густина, вологість) перед звужувальним пристроєм пальника. При цьому проведення попереднього калібрування пальника щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання дозволяє враховувати особливості функціонування пальника на різних сумішах природного газу, що виключає можливість випадкового впливу конструктивних особливостей пальника і недостовірності вимірювань із забезпеченням необхідної точності вимірювання і допустимої величини похибки.

Таким чином до числа конструктивних факторів реалізації методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу можна віднести вплив вологи навколишнього середовища на вимірюване значення температури спалювання газу, вплив конструктивних особливостей пальника, на якому здійснюється спалювання газу, а також особливості технічного підходу до вимірювання температури полум'я спалюваного газу і тривалості процесу вимірювання цієї температури.

При функціонуванні пристрою визначають теплоту згорання  $H_c$  природного газу за стандартних умов за формулою [14]:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (1)$$

де  $A$  – коефіцієнт конструктивного виконання пальника;  $T$  – температура полум'я пальника;  $B$  – коефіцієнт теплоти випаровування вологи повітря;  $K_i$  – коефіцієнт інжекції інжекторного пристрою пальника;  $\varphi$  – відносна вологість повітря навколишнього середовища;  $q_c$  – об'ємна витрата газу через торцевий звужувальний пристрій за стандартних умов;  $\tau$  – тривалість пропуску об'єму газу через пальник.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника  $A$  визначають під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згорання щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання як функцію від робочих параметрів згорання природного газу.

Оскільки при спалюванні газу згідно алгоритму (1) необхідне достатньо точно визначення його витрати, то одним із напрямків практичної реалізації може бути застосування первинних перетворювачів з використанням торцевих звужувальних пристроїв.

При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий звужувальний пристрій, розраховується за формулою:

$$q_c = 5,9736 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 K_\varphi \sqrt{\frac{P \Delta p}{\rho_c T K}}, \quad (2)$$

де  $q_c$  – об'ємна витрата газу через звужувальний пристрій, м<sup>3</sup>/с;  $\alpha$  – коефіцієнт витрати звужувального пристрою;  $\varepsilon$  – поправний множник на розширення газу;  $d$  – діаметр отвору звужувального пристрою пальника;  $\Delta p$  – перепад тиску на звужувальному пристрої;  $\rho_c$  – густина природного газу за стандартних умов;  $K_\varphi$  – коефіцієнт, який враховує вологість природного газу;  $P$ ,  $T$ ,  $K$  – абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості природного газу за умов звужувального пристрою відповідно.

Коефіцієнт витрати  $\alpha$  звужувального пристрою визначається експериментальним шляхом при його індивідуальному градуванні за допомогою еталонного обладнання, наприклад, дзвонової еталонної установки [5].

З аналізу формули (1) очевидним є вплив другої частини формули, тобто вологості навколишнього середовища (повітря), на результати визначення теплоти згорання природного газу. Тому проаналізуємо вплив цього фактору на вимірювальний процес.

На згорання природного газу також впливає волога, яка безпосередньо міститься в природному газі і поступає разом з ним у пальник, а також волога, яка знаходиться в навколишньому повітрі і також поступає до пальника через інжекційний пристрій забору зовнішнього повітря. Тому в реальних умовах використання природного газу нижчу фактичну теплоту  $H_{CF}$  його згорання можна розрахувати за формулою:

$$H_{CF} = H_C - H_R - H_\varphi, \quad (3)$$

де  $H_C$  – нижча теплота згорання, яка розраховується при хроматографічному аналізі сухого газу, наприклад, за методикою [4];  $H_R$  – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в природному газі;  $H_\varphi$  – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в навколишньому повітрі, яке приймає участь у згоранні газу.

Енергію  $H_R$  від вологи природного газу при умові його згорання при стандартних умовах (абсолютний тиск 101325 Па, температура 20 °С) можна розрахувати за формулою:

$$H_R = c_w \cdot m_1 \cdot (T_{TO} - T_S) + r \cdot m_1 + c_p \cdot m_1 \cdot (T_P - T_{TO}), \quad (4)$$

де  $c_w$ ,  $c_p$  – питома теплоємність води і водяної пари відповідно;  $m_1$  – маса води в газі;  $T_{TO}$ ,  $T_P$ ,  $T_S$  – температура пароутворення води, температура полум'я і нормоване значення температури за стандартних умов (20 °С) відповідно;  $r$  – питома теплота пароутворення води.

Вологість природного газу найчастіше оцінюють за температурою точки роси [5]. Тому для моделювання впливу вологості природного газу на його згорання прийнято межі зміни температури точки роси газу в межах від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Використовуючи відомі алгоритми і номограми [5] цей діапазон можна виразити в одиницях абсолютної вологості природного газу ( $8 \cdot 10^{-4} \dots 65 \cdot 10^{-4}$ )  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Як відомо, для повного згорання  $1\text{ м}^3$  природного газу необхідно  $2\text{ м}^3$  кисню, що витікає із стехіометричного рівняння спалювання газу. Враховуючи, що в навколишньому середовищі об'ємна доля кисню складає 21 %, то для спалювання  $1\text{ м}^3$  природного газу необхідний об'єм повітря буде становити  $2/0,21 = 9,52\text{ м}^3$ . Тому формулу для визначення  $H_{\varphi}$  можна записати у вигляді:

$$H_{\varphi} = 9,52 \cdot c_w \cdot m_2 \cdot (T_{TO} - T_S) + 9,52 \cdot r \cdot m_2 + 9,52 \cdot c_p \cdot m_2 \cdot (T_P - T_{TO}), \quad (5)$$

де  $m_2$  – маса води в  $1\text{ м}^3$  повітря.

Відносні похибки  $\delta$  від впливу вологи на визначення теплоти згорання природного газу розрахуємо за алгоритмами:

$$\delta_R = \frac{H_{FR} - H_C}{H_N} \cdot 100\%, \quad (6)$$

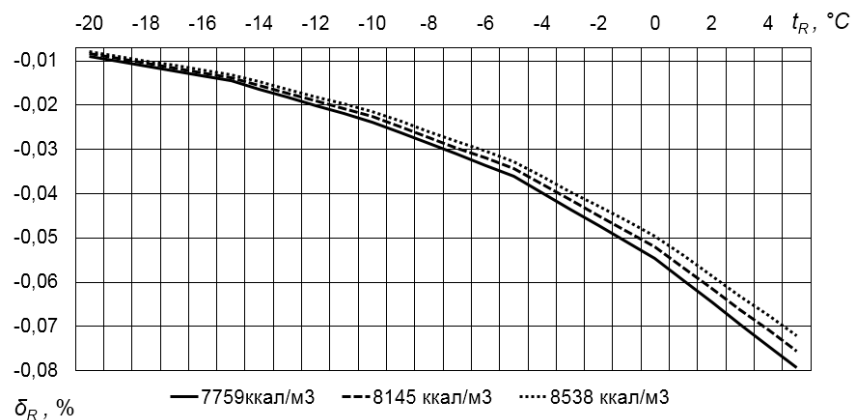
$$\delta_{\varphi} = \frac{H_{F\varphi} - H_C}{H_N} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де  $\delta_R$  – похибка від наявності супутньої вологи у природному газі;  $\delta_{\varphi}$  – похибка від наявності вологи у повітрі, яке приймає участь у згоранні газу.

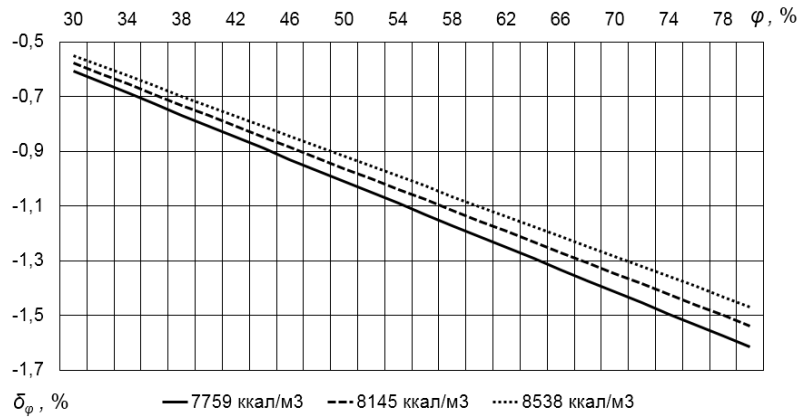
Для реалізації алгоритмів (6) і (7) необхідне використання конкретних даних про компонентний склад або нижчу теплоту згорання реальних природних газів, які отримуються на основі їх хроматографічного аналізу.

Результати математичного моделювання зміни відносної похибки  $\delta_R$  від температури точки роси природного газу (рис. 1а) та відносної похибки  $\delta_{\varphi}$  від відносної вологості повітря (рис. 1б) здійснені для конкретних проб газів з нижчою теплотою згорання  $7759\text{ ккал}/\text{м}^3$ ,  $8145\text{ ккал}/\text{м}^3$  та  $8538\text{ ккал}/\text{м}^3$  за умови температури спалювання  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На графіках (рис. 1а,б) спостерігається зростання від'ємної похибки при визначенні теплоти згорання природного газу за умови зростання його вологості та вологості навколишнього повітря. Очевидною є нелінійна зміна відносної похибки  $\delta_R$  від температури точки роси газу, яка кількісно характеризується межами зміни відносної похибки від 0,01 % до 0,08 % при зростанні температури точки роси від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однак зміна відносної похибки  $\delta_{\varphi}$  від вологості навколишнього повітря практично є лінійною і свідчить про суттєво більшу кількісну зміну похибки від 0,6 % до 1,6 % при зростанні відносної вологості повітря від 30 % до 80 %. При цьому для газів із меншою теплотою згорання вплив зміни вологості є більш вагомим і зростає із збільшенням вологи як природного газу так і повітря. Так при зміні калорійності газу від  $7759\text{ ккал}/\text{м}^3$  до  $8538\text{ ккал}/\text{м}^3$  для газу із  $t_R = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  розходження в похибках становить 0,001 %, а при  $t_R = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  воно збільшується до 0,008 %. Кількісне значення діапазону зміни похибки від вологи повітря для вказаного діапазону зміни складу природного газу становить 0,05 % при відносній вологості 30 % і 0,16 % при відносній вологості 80 %.



а)



б)

Рис. 1. Графічна ілюстрація зміни відносної похибки при визначенні нижчої теплоти згорання природного газу від температури точки роси (а) та від вологості навколишнього повітря (б)

Для проведення експериментальних досліджень щодо впливу конкретних конструктивних факторів виготовлення пристрою, який реалізує спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу розроблений лабораторний стенд (рис. 2)

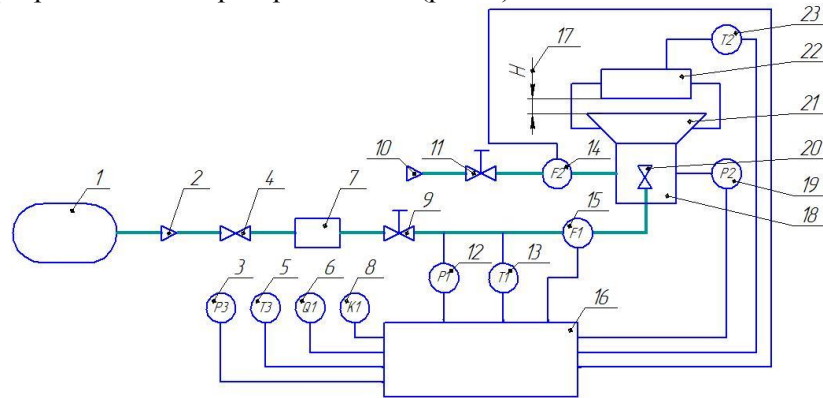


Рис. 2. Схема лабораторного стенду для контролю теплоти згорання природного газу

Лабораторний стенд (рис.2) містить балон 1 зі стиснутим природним газом з відомими його фізико-хімічними показниками, лінію 2 і кран 4 подачі газу, осушувач газу 7, вузол 9 регулювання витрати подачі газу, витратомір 15, пальник 21 із торцевим звукувальним пристроєм 20. Пальник 21 обладнаний інжектором 18 навколишнього повітря, витрата повітря до якого подається лінією 10, вимірюється витратоміром 14 і задається регулятором 11. Теплоту згорання вимірюють по температурі пластини 22, яка нагрівається полум'ям пальника 21, відстань до якої можна регулювати пристроєм 17. Система збору і обробки вимірювальної інформації 16 також містить датчі тиску 12 та температури 13 досліджуваного газу, датчі тиску 19 в інжекторі, перетворювач 23 температури пластини, а також датчі тиску 3, температури 5 та вологості 6 навколишнього середовища і цифровий хронометр 8.

Згідно запропонованої методики визначення теплоти згорання природного газу проводиться за його температурою спалювання [13]. Для цього потрібно вимірювати температуру, що може бути полум'я газу.

Як видно з алгоритму (1) для реалізації способу [13] потрібно безпосередньо вимірювати температуру полум'я газу. При цьому алгоритм (1) містить коефіцієнт  $A$ , який передбачає врахування конструкції пальника та може реалізувати вимірювання температури тіла як функції температури полум'я газу. Тому доцільним є порівняльний аналіз застосування різних технічних підходів до вимірювання температури полум'я для побудови модельного рівняння визначення теплоти згорання природного газу.

Одним із варіантів практичної реалізації вимірювання температури згорання газу може бути визначення температури за ступінню нагрівання пластини. Такий підхід за фіксованих значень витрати газу і витрати повітря буде опосередковано характеризувати теплоту згорання

природного газу. Однак необхідним при цьому є дослідження місця вимірювання температури пластини, під якою здійснюється згорання газу.

Розроблена схема досліджень (рис. 3) містить пірометр 1, пластину 2, розсікач полум'я 5 із кришкою розсікача 4, витратомір газу 6 та витратомір повітря 7. Полум'я при згоранні газу вказано позицією 3.

Для досліджень вибрано пальник з діаметром розсікача полум'я  $d=80$  мм, дві металеві пластини діаметром  $D=140$  мм та товщинами  $\delta_1=0,8$  мм та  $\delta_2=2$  мм. Пластини розміщуються над пальником на висоті  $h=10$  мм. При цьому витрата повітря становила  $1,47 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, а витрата природного газу –  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с.

При дослідженнях суміш природного газу і повітря потрапляє до камери розсікача полум'я 5, звідки виходить назовні через отвори, утворені кришкою розсікача полум'я 4 і згорає. Полум'я 3 нагріває пластину 2, температуру поверхні якої вимірювали пірометром моделі Venetech GM320.

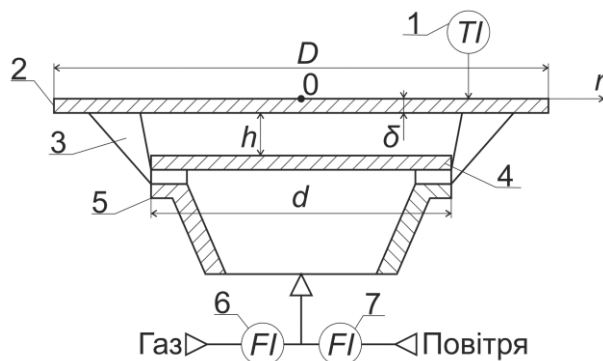


Рис. 3. Схема досліджень температурного поля пластини

Температуру поверхні пластини вимірювали після завершення перехідного процесу, тобто при стабілізації локальної температури на поверхні пластини. Після цього пірометром вимірювали температуру на поверхні пластини вздовж її радіуса з інтервалом 5 мм (рис. 4).

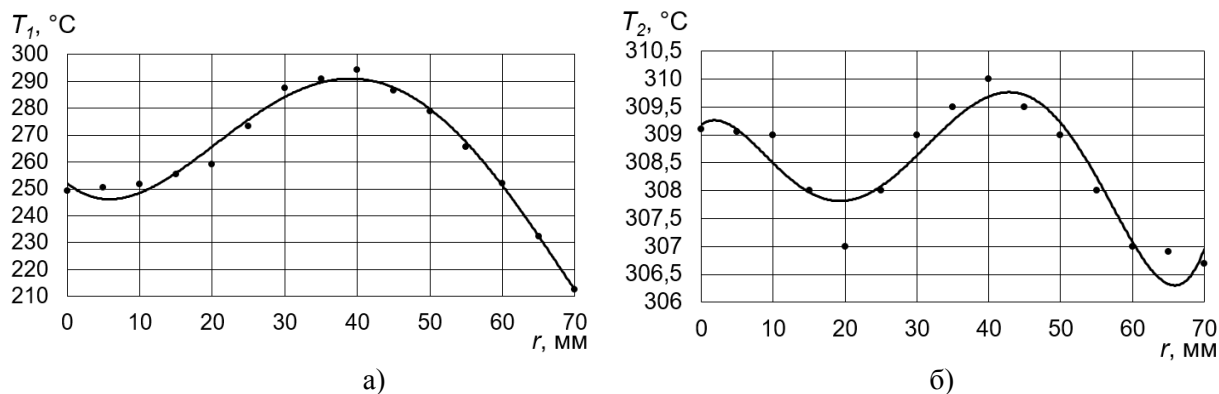


Рис. 4. Графічне зображення залежності температури  $T$  від координати  $r$  поверхні пластини товщиною 0,8мм (а) та 2,0 мм (б)

Отримані експериментальні точки можна апроксимувати такими виразами:

$$T_1 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot r^4 - 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot r^3 + 0,2321 \cdot r^2 - 2,2108 \cdot r + 252,1; \quad (9)$$

$$T_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot r^5 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot r^4 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot r^3 - 0,0286 \cdot r^2 + 0,0889 \cdot r + 309,19, \quad (10)$$

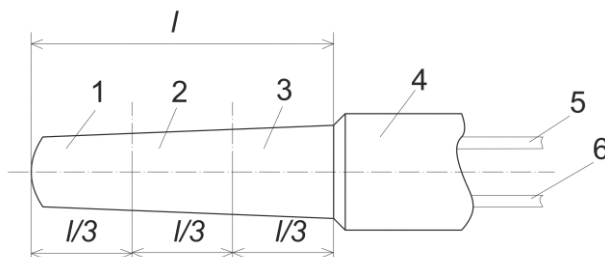
де  $T_1$ ,  $T_2$  – температура першої і другої пластини відповідно.

На тоншій пластині є суттєвий градієнт температури вздовж поверхні пластини (зміна температури стосовно розмірів розсікача полум'я становить 40°C, причому максимальне значення 290°C близьке до радіуса розсікача полум'я). Товстіша пластина хоча і характеризується більш складною формою розподілу температури, однак також її максимальне значення близьке до радіуса розсікача полум'я, а градієнт температури є суттєво меншим (близько 4 °C). В обох випадках очевидним є зменшення температури внаслідок теплообміну країв пластини з навколишнім середовищем.

Отримані результати вказують на необхідність врахування конструктивних параметрів пальника, а також товщини пластини.

Для вимірювання безпосередньо температури полум'я  $T_{TP}$  досліджено можливість застосування термопари типу К (градувальна характеристика ТХА) [14]. Для цього проведені додаткові дослідження їх функціонування за умов визначення теплоти згорання природного газу, які характеризуються перебуванням термопари безпосередньо в полум'ї спалюваного газу.

Зони нагрівання термопари умовно були поділені на три частини, як зображено на рис.5. Експериментально встановлено оптимальність нагрівання в зоні 2, як найбільш чутливій до місця її нагріву полум'ям (кожна зона становить третю частину від загальної довжини  $l=70$  мм чохла термопари).



1, 2, 3 – зони нагрівання термопари; 4 – під'єднувальний кабель;  
5, 6 – під'єднувальні провідники

Рис. 5. Схема термопари при вимірюванні температури полум'я природного газу

Також проводилися експериментальні дослідження динамічних характеристик термопари і процесу нагрівання пластин (рис. 6). Результати досліджень свідчать про експоненційний вид залежності вихідного сигналу перетворювача і зміни температури пластин при їх нагріванні полум'ям спалюваного газу. Отримані закономірності відповідають відомим видам динамічних характеристик перетворювачів, як аперіодичної ланки першого порядку. Експериментально встановлено, що постійна часу для термопари К (ТХА) є близькою до 150 с (рис. 6а). При використанні пластини постійні часу суттєво відрізняються і становлять близько 35 с для тонкої пластини і 120 с – для товстої пластини (рис. 6б). За останньої умови постійною часу пірометра, який вимірює температуру пластини, можна нехтувати.

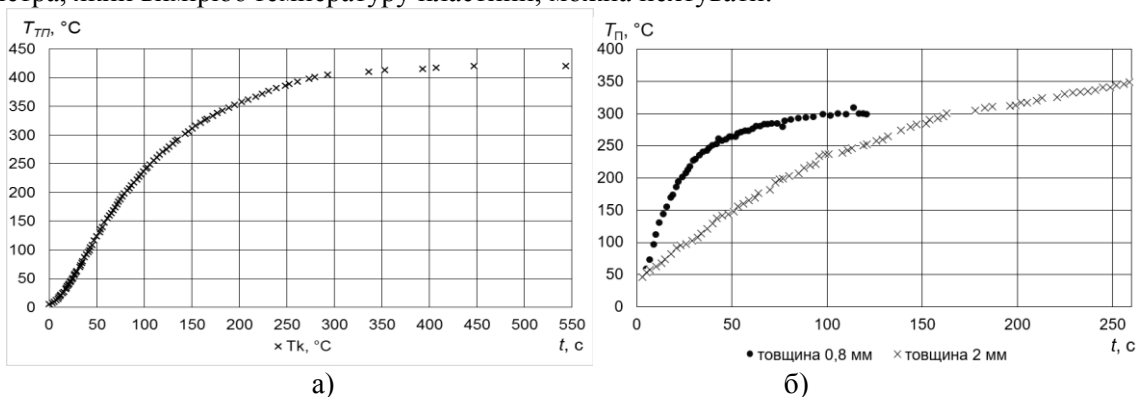


Рис. 6. Графічна ілюстрація динамічних характеристик термопари типу К (ТХА) (а) та зміни температури металевих пластин різної товщини (б)

Отримані результати вказують на необхідність вибору тривалості спалювання газу з врахуванням конструктивних особливостей застосовуваних термоперетворювачів і опосередкованого методу вимірювання температури полум'я газу при визначенні теплоти згорання природного газу за його температурою спалювання.

**Висновки.** Проведено аналіз відомих нормативних методів і технічних рішень для розрахункового і експериментального методу визначення теплоти згорання природного газу. Показано, що практично всі методи передбачають визначення калорійності сухого газу, що досягається його попереднім осушуванням. Розглянуто необхідність визначення теплоти згорання природного газу у споживачів за місцем роботи газоспоживного обладнання.

Викладено технічне рішення для дослідження запатентованого авторами способу визначення теплоти згорання природного газу прямим методом за температурою згорання газу.

Кількісно оцінена зміна відносної похибки визначення теплоти згорання природного газу від вологості газу і вологості повітря для умов реалізації запропонованого способу визначення теплоти згорання для конкретних трьох проб газу з теплою згорання 7759 ккал/м<sup>3</sup>, 8145 ккал/м<sup>3</sup> та 8538 ккал/м<sup>3</sup>. Встановлено, що із збільшенням вологості газу зростає від'ємна відносна похибка, яка оцінюється 0,08 % при температурі роси газу плюс 5 °С. Поряд з цим збільшення вологості навколишнього повітря може викликати збільшення відносної похибки до мінус 1,6 % при відносній вологості повітря 80 %.

Досліджено вплив конструктивних факторів, які впливають на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. Це стосується моделювання температурного поля поверхні пластини при опосередкованому вимірюванні за допомогою них температури полум'я газу, який спалюється. Встановлено наявність суттєвого градієнта температури вздовж поверхні тонкої пластини та набагато менше її значення для грубої пластини.

Досліджені динамічні характеристики нагрівання пластини і термопари при вимірюванні температури полум'я, які змінюються в межах від 35 с до 150 с в залежності від конструктивного виконання. Це дозволяє вибирати тривалість вимірювального процесу від впливу конструктивних факторів пальників при спалюванні газу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на дослідження впливу співвідношення газ-повітря на температуру спалювання газу з метою визначення підняття чутливості методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. Також будуть проведені дослідження по впливу якісних характеристик газу на його температуру спалювання.

#### Інформаційні джерела

1. ISO 15112:2007. Natural Gas – Energy determination
2. EN 1776:2015. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements
3. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії: [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: держспоживстандарт України, 2011. 53 с. (Національний стандарт України)
4. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: [Чинний від 12.04.1996]. Изд. офіц. Минск, 1996. 21 с. (Межгосударственный стандарт)
5. Облік природного газу: довідник / [М.П.Андрієшин, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. С.А.Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.
6. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. [та ін.]: пат. 92846 С2 Україна, МПК (2009) G01N25/20. № а200905201: заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10; Бюл. № 23.
7. Method of and means for accurately measuring the calorific value of combustible gases / William H., Clingman, Jr.: pat. 4062236 United States, IPC G01N 25/30.
8. Serediuk O., Malisevych V., Warsza Z.L., Metoda termoanemometryczna pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego. Przemysł Chemiczny. 2017. T. 96, Nr 11, S. 2243–2246.
9. Малісевич В.В., Середюк О.Є. Експериментальні дослідження термоанемометричного витратоміра при обліку природного газу за його енергетичною цінністю. Методи і прилади контролю якості. 2014. №2(33). С.78-85.
10. Serediuk O., Malisevych V., Warsza Z.L., Symulacja związku właściwości cieplnych i energii gazu ziemnego w pomiarach jego przepływu. Przemysł Chemiczny, 2017. T. 96, Nr 10, S. 2065–2069.
11. Roslonek G. Uwarunkowania wdrożenia rozliczeń paliw gazowych w jednostkach energii w krajowym systemie gazowniczym / G. Roslonek // Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja: Konf. Nauk.-Techn. FORGAZ 2014, 15-17 stycznia 2014r., Muszyna: Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu, Nr 194. – Krakow: Instytut Nafty i Gazu, 2014. – S.139-143.
12. Roslonek G. Kierunki rozwoju Standardów Technicznych IGG w obszarze analityki paliw gazowych. Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja: Konf. Nauk.-Techn. FORGAZ 2016, Krakow: Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu. – Krakow: Instytut Nafty i Gazu, 2016. – S.63-70.



13. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Середюк О.Є., Лютенко Т.В, Малісевич Н.М.: пат. 112737 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/20. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл. № 19.

14. Середюк О.Є., Малісевич Н.М. Аналіз патенто захищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. Методи та прилади контролю якості. 2018. № 1 (40). С. 58-69.

15. <https://elcer.com.ua/products/komplektuyushchie/termopary/>

**О. Середюк, д.т.н., Н. Малісевич, аспірантка**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

*Проведен анализ известных нормативных методов и технических решений для расчетного и экспериментального метода определения теплоты сгорания природного газа. Обоснована необходимость определения теплоты сгорания влажного природного газа у потребителей по месту работы газоспоживного оборудования. Изложены техническое решение для реализации запатентованного авторами метода определения теплоты сгорания природного газа прямым методом с температурой сгорания газа. Количественно оценена изменение относительной погрешности определения теплоты сгорания природного газа от влаги газа и влаги воздуха для условий реализации предложенного способа определения теплоты сгорания для конкретных трех проб газа с теплотой сгорания 7759 ккал/м<sup>3</sup>, 8145 ккал/м<sup>3</sup> и 8538 ккал/м<sup>3</sup>. Установлены закономерности изменения относительной погрешности определения теплоты сгорания от двух составляющих влажности. Осуществлено моделирование относительной погрешности определения теплоты сгорания природного газа одновременно от его влажности и влажности окружающего воздуха. Исследовано влияние конструктивных факторов, влияющих на техническую реализацию метода экспресс-контроля теплоты сгорания природного газа. Установлено наличие существенного градиента температуры вдоль поверхности тонкой пластины и намного меньше ее значение для толще пластины. Исследованы динамические характеристики нагрева пластины и термопары при измерении температуры пламени.*

**Ключевые слова:** природный газ, теплота сгорания, влажность газа, влажность воздуха, термопреобразователи, температура пламени.

**O. Serediuk, Doctor of Technical Sciences, N. Malisevich, PhD student**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

### **RESEARCH OF INFLUENCE OF STRUCTURAL FACTORS ON THE TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE EXPRESS CONTROL METHOD OF NATURAL GAS COMBUSTION**

*The analysis of the known regulatory methods and technical solutions for the calculation and experimental method of determining the heat of combustion of natural gas is carried out. The necessity to determine the heat of combustion of wet natural gas by consumers at the place of work of gas-consuming equipment is substantiated. The technical solution for the implementation of the patented method for determining the heat of combustion of natural gas by the direct method of gas combustion temperature. The quantitatively estimated change in the relative error of determination of natural gas combustion heat from gas moisture and air humidity for the conditions of implementation of the proposed method of determining combustion heat for specific three gas samples with combustion heat of 7759 kcal/m<sup>3</sup>, 8145 kcal/m<sup>3</sup> and 8538 kcal/m<sup>3</sup>. The regularities of change of relative error of determination of combustion heat from two components of humidity are established. The relative error of determining the heat of combustion of natural gas simultaneously from its humidity and humidity of the surrounding air is simulated. The influence of design factors that influence the technical implementation of the method of express control of the heat of combustion of natural gas is investigated. The presence of a significant temperature gradient along the surface of the thin plate and much less its value for the coarser plate was established. Dynamic characteristics of plate and thermocouple heating in the measurement of flame temperature are investigated.*

**Keywords:** natural gas, combustion heat, gas humidity, air humidity, thermoconverters, flame temperature.

УДК 631.356.22

Солтисюк В.І., Семенів І.І., Яциків М.М.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-13>

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАЛОГАБАРИТНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

*Приведено методичку відпрацювання малогабаритної сільськогосподарської техніки на технологічність конструкції з точки зору забезпечення надійності, довговічності та простоти її роботи. Встановлено критерії за якими оцінюють технологічність конструкції малогабаритної сільськогосподарської техніки. Відображені ефективні методи проектування та конструювання машин. Передбачено ряд різних загально-кількісних, технологічних і загальноекономічних показників технологічності конструкцій машин. Визначені показники розподілу деталей, що входять в машину, за призначенням, спадкоємністю, уніфікацією, точністю, вживаним матеріалом і ступеню їх використання, по ступеню технологічної складності деталей, ступені складності складальних операцій, трудомісткості і собівартості виробу. З'ясовано, що компоновку машин доцільно здійснювати з найменшим розчленовуванням на окремі складальні одиниці, при складанні можна допускати деякі припасувальні роботи, якщо виготовлення взаємозамінних деталей викликає труднощі. Компоновка машини повинна забезпечувати її розчленовування на окремі вузли і агрегати, що дозволяють вести паралельне складання, регулювання і випробування їх, а загальне складання здійснювати на потоці.*

**Ключові слова:** *техніка, малогабаритна, конструкція, технологічність.*

Якість конструкції будь-якої машини визначається не тільки її надійністю, довговічністю і експлуатаційними показниками, але і цілим рядом виробничо-технологічних властивостей, що визначають можливість організації найбільш раціонального виробничого процесу її виготовлення при заданому масштабі випуску і конкретних виробничих умовах. Сукупність цих властивостей для конструкції машини в цілому або окремих її деталей об'єднується в єдиний показник, званий технологічністю конструкції.

Метою досліджень є відпрацювання конструкції навісної 3-х рядної бурякозбиральної машини на технологічність.

Поняття «технологічність конструкції» охоплює як технічну, так і економічну сторони виробництва, які ніколи не слід розділяти, оскільки вони взаємозв'язані. Проблема створення технологічних конструкцій машин має важливе народногосподарське значення. Правильне її рішення дозволяє: а) понизити трудомісткість і собівартість виготовлення машини; б) краще використовувати наявні основні засоби підприємств; в) понизити витрати на підготовку виробництва; г) зменшити терміни освоєння машини.

Технологічною вважають конструкцію, яка може бути швидко і з мінімальними витратами освоєна у виробництві і виготовляється найбільш раціональними способами в заданих кількостях і умовах виробництва. Технологічність конструкції машини визначається сукупністю кінематичних, конструктивних і технологічних рішень, здійснюваних в процесі проектування машини на основі порівняльного техніко-економічного аналізу.

Для об'єктивної оцінки технологічності конструкції застосовуються різні техніко-економічні показники. Ця система передбачає цілий ряд різних загально-кількісних, технологічних і загальноекономічних показників технологічності конструкцій машин, надійність та довговічність. Такими показниками є розподіл деталей, що входять в машину, за призначенням, спадкоємності, уніфікації, точності, вживаним матеріалом і ступеню їх використання, по ступеню технологічної складності деталей, по розчленованій машині на складальні одиниці, ступені складності складальних операцій, трудомісткості і собівартості виробу і т.д.

Запропоновані показники технологічності конструкцій машин можуть бути використані при виборі варіантів різних конструктивних рішень, проте, користуючись ними, треба обов'язково враховувати сукупність окремих кількісних і технологічних показників, оскільки поліпшення одних показників може йти за рахунок погіршення інших. Крім того, необхідно враховувати масштаб випуску машин і умови виробництва на заводі-виробнику.

Конструкція машини повинна відповідати масштабу її виробництва, оскільки виробничо-технологічні вимоги до конструкції в умовах одиничного і дрібносерійного

виробництва корінним чином відрізняються від відповідних вимог при великосерійному і масовому виробництві. Так, машини, що проектуються для дрібносерійного виробництва, не повинні мати деталей, виготовлення яких вимагає застосування складного і дорогого технологічного оснащення і спеціального устаткування. Компоновку машин в цих випадках звичайно доцільно здійснювати з найменшим розчленовуванням на окремі складальні одиниці, при складанні можна допускати деякі припасувальні роботи, якщо виготовлення взаємозамінних деталей викликає труднощі. Для умов багатосерійного і масового виробництва деталі і машини повинні конструюватися з урахуванням можливостей застосування для їх виготовлення найбільш високопродуктивних, прогресивних поточкових методів виробництва заготовок і обробки, механізації і автоматизації всіх виробничих процесів. Компоновка машини повинна забезпечувати її розчленовування на окремі вузли і агрегати, що дозволяють вести паралельне складання, регулювання і випробування їх, а загальне складання здійснювати на потоці. Деталі і вузли повинні бути взаємозамінні.

Таким чином, машина, технологічна по конструкції для одиничного і дрібносерійного виробництва буде нетехнологічною для масового виробництва, і навпаки.

Технологічність конструкції повинна розглядатися щодо всього виробу в цілому, як комплексне рішення задачі, що враховує вимоги по всіх складових частинах виробничого процесу виготовлення машини. Основним критерієм оцінки технологічності конструкції деталі, машини є собівартість їх виготовлення і найбільш ефективно використання капіталовкладень при рівноцінних експлуатаційних характеристиках.

Для того, щоб конструкція машини була технологічною, при її проектуванні необхідно:

- 1) вибрати найбільш раціональну схему і компоновку машини, раціонально розчленувати її на складальні вузли, добиватися найбільш простих конструктивних рішень при розробці вузлів і агрегатів і зменшення загальної кількості деталей в машині;
- 2) максимально використовувати стандартні, нормалізовані і уніфіковані вузли, агрегати і деталі, а також деталі, вже освоєні у виробництві;
- 3) при конструюванні деталей враховувати вимоги технологічності, надійності та довговічності.

Основи технологічності конструкції машини закладаються вже при розробці кінематичної схеми і компоновки машини. На цьому етапі проектування сільськогосподарських машин необхідно разом із забезпеченням агротехнічних і експлуатаційних вимог добиватися таких конструктивних рішень, які забезпечили б мінімальну вагу машини і витрату матеріалу, а також найменшу її трудомісткість виготовлення. Технологічність конструкції машини значною мірою залежить від вибору кінематичної схеми. Раціональна схема повинна мати мінімальну кількість ланок в кінематичному ланцюгу.

Короткий кінематичний ланцюг дозволяє мати в машині меншу кількість деталей, зменшити габарити корпусних деталей, понизити вагу машини і трудомісткість її виготовлення.

Великий вплив на технологічність конструкції має вибір раціональної компоновки машини. У сільськогосподарських машинах значне зниження ваги досягається за рахунок передачі частини навантаження від ваги машини на колеса трактора або самохідного шасі. За рахунок цього представляється можливим зменшити розміри рами машини, скоротити кількість коліс і пов'язаних з їх кріпленням вузлів. В цілях спрощення конструкції і скорочення ваги більшість причіпних машин (сівалки, культиватори, косарки, силосозбиральні, картоплюзбиральні комбайни і ін.) проектують з опорою на причіпну скобу трактора. Подальше вдосконалення компоновки в цьому напрямку привело до створення навісних машин, що не мають ходової частини. Такі машини по вазі в середньому на 35-50% легші за причіпні машини однакового призначення і такої ж продуктивності.

Однією з найважливіших умов технологічності конструкції машини є відповідність продуктивності її основних агрегатів. Річна продуктивність робочих органів, механізмів і транспортних пристроїв в одній машині призводить до зниження її експлуатаційної продуктивності і низькому використанню окремих агрегатів.

Компоновка машини повинна передбачати найбільш раціональне для заданих умов виробництва розділення машини на вузли і агрегати. Для серійного і масового виробництва рекомендується розділити машину на такі вузли, щоб можна було вести паралельне і незалежне складання, регулювання і випробування вузлів. Це дає можливість полегшити складальні процеси, використати поточкові методи при складанні, організувати виготовлення вузлів в цехах по замкнутому циклу, скоротити його цикл. Для зниження трудомісткості складальних процесів

необхідно виключати пригоночні роботи, передбачати зручність виконання складальних робіт, можливості застосування при складанні засобів механізації.

Складність конструкції машини залежить від складності конструкції вхідних в неї вузлів і агрегатів. Тому при конструюванні вузлів треба точно встановити функції, які повинен виконувати кожний з них, і проектувати вузли, здатні виконувати функції вибираючи найбільш прості варіанти.

Технологічність конструкції машини поліпшується, якщо в неї входить менше деталей. Це може бути досягнуто не тільки за рахунок застосування коротших кінематичних ланцюгів, але і за рахунок скорочення зайвих з'єднань, що дає можливість зменшити кількість допоміжних і кріпильних деталей.

Конструктивна уніфікація дає можливість усунути необгрунтоване конструктивне різноманіття вузлів і деталей, скоротити номенклатуру вживаних матеріалів, технологічного оснащення і в результаті цього створити технологічнішу конструкцію машини.

На рис. 1 представлена конструкція 3-х рядної коренезбиральної машини з продуктивністю за 1 годину - 0,5 га/год; робоча швидкість 4...5 км/год; маса машини 660 кг; агрегується з тракторами МТЗ-80/82; Т-70.

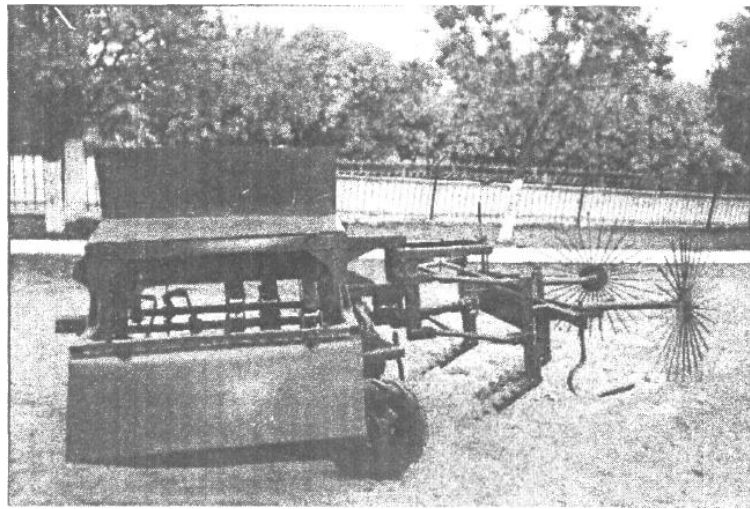


Рис. 1. Конструкція 3-х рядної бурякозбиральної машини (загальний вигляд).

Виготовлений і випробуваний дослідний взірець коренезбиральної 3 рядної машини підтвердив її роботоздатність, малу метало- і енергомісткість, що дозволяє використовувати її при роботі в фермерських і інших господарствах при якісному виконанні технологічного процесу.

Враховуючи сезонність використання сільськогосподарської техніки вони повинні конструюватися на основі методів модульного компонування, наприклад можливості уніфікації конструктивних елементів і вживаних матеріалів для деталей сільськогосподарських машин.

Ефективним методом проектування машини є агрегування. Цей метод заснований на використанні в проєктованих машинах стандартних або нормалізованих вузлів і агрегатів, що дає можливість швидко здійснювати проектування і освоєння виробництва машин високої якості. Конструктивна уніфікація має велике значення для швидкого створення і освоєння випуску нових, більш довершених конструкцій машин.

При конструюванні нової машини слід по можливості забезпечувати конструктивну спадкоємність, тобто використання в новій конструкції вузлів і деталей, що вже йдуть у виробництві. Це дозволить скоротити терміни підготовки виробництва і освоєння нової машини, а також підвищити її надійність та довговічність.

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. запропонована методика відпрацювання малогабаритної сільськогосподарської техніки на технологічність конструкції, яка забезпечує надійну роботу. Встановлені критерії за якими оцінюють технологічність малогабаритної сільськогосподарської техніки.

2. Розроблена, виготовлена і відпрацьована на технологічність конструкція навісної 3-х рядної коренезбиральної машини, яка підтвердила свою досконалість і експлуатаційну надійність.

### Інформаційні джерела

1. Анилович В.Я., Карпов В.Г. Обеспечение надежности сельскохозйственной техники. К.: Техника, 1989, 125с.
2. Брей В.В. Исследование й разработка механизированного процесса извлечения из почвы корней сахарной свеклы: Автореф. дис. канд. техн. наук.- К., 1972. - 32 с.
3. Погорельый Л.В., Татьянако Н.В., Брей В.В. й др. Свеклоборочные машины: Конструирование й расчет. -К.: Техника, 1983- 168 с.
4. Босой Е.С., Верняков О.В., Смирнов И.И. и др. Теория, конструкция и расчет сельхозмашин. – М.: Машиностроение, 1978. – 567с.
5. Деклараційний патент №11221 Україна, Машина навісна коренезбиральна. Гнатко М.В., Казюка І.Є. та інші. Бюл.№12, 2005р.

Солтисюк В.І., Семенів І.І., Яциків М.М.

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

*Приведены методика отработки малогабаритной сельскохозйственной техники на технологичность конструкции с точки зрения обеспечения надежности, долговечности и простоты ее работы. Установлены критерии по которым оценивают технологичность конструкции малогабаритной сельскохозйственной техники. Отражены методы проектирования и конструирования машин. Предусмотрен ряд различных общеобразовательных количественных, технологических и общеэкономических показателей технологичности конструкций машин. Определены показатели распределения деталей, входящих в машину, по назначению, преемственностью, унификацией, точностью, применяемым материалам и степени их использования, по степени технологической сложности деталей, степени сложности сборочных операций, трудоемкости и себестоимости изделия. Звьясовано, что компоновку машин целесообразно осуществлять с наименьшим расчленением на отдельные сборочные единицы, при составлении нельзя допускать некоторые припасувальни работы, если изготовление взаимозаменяемых деталей вызывает трудности. Сборка машины должна обеспечивать ее расчленения на отдельные узлы и агрегаты, позволяющие вести параллельное сборка, регулировка и испытание их, а общая сборка осуществлять на потоке.*

**Ключевые слова:** техника, малогабаритность, конструкция, технологичность.

V.I. Soltysyuk, I.I. Semeniy, M.M. Yatsyktiv

### CONSTRUCTIVE TECHNOLOGICAL METHODS OF PROVIDING THE RELIABILITY OF SMALL AGRICULTURAL EQUIPMENT

*The technique of working out of small-sized agricultural machinery on the manufacturability of the construction in terms of reliability, durability and simplicity of its work is presented. The criteria for evaluating the manufacturability of small-sized agricultural machinery are established. Effective methods of designing and constructing machines are shown. There are a number of different quantitative, technological and economic indicators of manufacturability of machine designs. Indicators of the distribution of parts included in the machine, by purpose, continuity, unification, accuracy, materials used and the degree of their use, the degree of technological complexity of parts, the complexity of assembly operations, complexity and cost of the product. It has been found that it is advisable to assemble machines with the smallest possible breakdown into separate assembly units, while some assembly work may be permitted during assembly if the manufacture of interchangeable parts is difficult. The layout of the machine must ensure its breakdown into separate units and units that allow parallel assembly, adjustment and testing, and the overall assembly to be carried out on the flow.*

**Keywords:** technique, small size, design, manufacturability.

УДК 622.232

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-14>

Стасюк В.М., к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## ДИНАМІКА ПІДКРИТИЧНОГО РЕЖИМУ ПНЕВМОМЕХАНІЧНИХ ПРИВОДІВ МАШИН УДАРНОЇ ДІЇ

*Завдання підвищення надійності пневматичних машин ударної дії завжди залишалося та залишається актуальним, зокрема і тих із них, що оснащені приводами із пневмомеханічними системами керування. Це стосується як надкритичного, так і підкритичного режимів їх експлуатації.*

*У даній статті виконані дослідження підкритичного режиму. З метою встановлення стійкості функціонування вищезазначеного приводу досліджено динаміку зміни тиску в його робочих камерах на фазах їх наповнення та спорожнення з використанням сталої часу інерційної ланки, величини провідності впускного елемента пневмомеханічної системи керування, коефіцієнта витрат системи повітророзподілу, сталих часу наповнення та спорожнення, а також функції співвідношення тисків при наповненні пневмокамери при підкритичному режимі надходження енергоносія та функції співвідношення тисків при спорожненні пневмокамери при підкритичному режимі випуску відпрацьованого повітря.*

*Використовуючи отримані результати досліджень, можна шляхом раціонального підбору розмірів конструктивних елементів пневмомеханічної системи повітророзподілу та параметрів робочих і компенсаційних камер істотно впливати на стійкість роботи пневмомеханічних приводів у підкритичному режимі.*

*Доведено, що у процесі проведення досліджень варто також враховувати специфіку контактної взаємодії штока клапанного механізму з поршнем-ударником. Адже від надійності спрацювання клапанного механізму на початку фаз впуску-випуску енергоносія істотно залежить надійність машини ударної дії під час її експлуатації.*

**Ключові слова:** пневмопривод, підкритичний режим, енергоносії, стиснене повітря, поршень-ударник.

**Постановка проблеми.** Надходження стисненого повітря у робочі камери приводів із пневмомеханічним керуванням та його випуск протягом робочого циклу здійснюється як у підкритичному, так і у надкритичному режимах. Відмови в роботі таких приводів можливі через специфіку підкритичного режиму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Окремі аспекти роботи пневматичних приводів при підкритичному та надкритичному режимах надходження та випуску енергоносія розглядаються у роботах [1-4]. Однак про особливості динаміки підкритичних і надкритичних режимів пневмомеханічних приводів у них не йдеться.

**Формулювання цілей статті.** Дослідити динаміку підкритичного режиму пневмомеханічних приводів з метою можливості конструктивного забезпечення його стійкості.

**Результати досліджень.** У цій роботі наведені кінцеві результати теоретичних досліджень підкритичного режиму пневмомеханічних приводів без проміжних виведень та розрахунків. При цьому за основу прийняті методики, запропоновані у роботах [1-4].

Досить повно динаміку зміни тиску в робочій камері змінного об'єму пневматичного приводу із пневмомеханічним керуванням при підкритичному режимі її наповнення стисненим повітрям можна описати формулою:

$$\frac{dp_H}{dt} = \frac{(p_M - p_a)\Phi(x, \dot{x}, t)\psi_1(\sigma)p_M\sigma}{\sigma^2 p_M - (p_M - p_a)\theta(x, t) \left[ \frac{\varphi(\sigma_*)\sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\sqrt{1-\sigma^{\frac{k-1}{k}}}} - \psi_1(\sigma) \right]}, \quad (1)$$

де  $\frac{dp_H}{dt}$  – зміна тиску в робочій камері змінного об'єму пневматичного приводу із пневмомеханічним керуванням при підкритичному режимі її наповнення;

$p_M$  – тиск живлення системи;

$p_a$  – атмосферний тиск;

$$\Phi(x, \dot{x}, t) = \frac{d\theta(x, t)}{dt}, \text{ де } \theta(x, t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0 F(x_0 + x)}} \quad (t - \text{стала часу інерційної ланки: } t = \frac{V}{RT_M \alpha},$$

де  $V$  – об'єм камери наповнення;  $R$  – газова стала;  $T_M$  – абсолютна температура повітря в камері наповнення;  $\alpha$  – провідність впускного елемента системи повітророзподілу, через який стиснене повітря із пневмолінії надходить у камеру наповнення;  $\tau_0$  – стала часу наповнення;  $F$  – площа поперечного перерізу суцільноциліндричної частини поршня-ударника;  $x_0$  – початкова координата поршня-ударника, яка визначає компенсаційний об'єм камери наповнення;  $x$  – поточна координата поршня-ударника);

$\psi_1(\sigma)$  – функція співвідношення тисків при наповненні пневмокамери;

$$\sigma = \frac{p_H}{p_M} - \text{співвідношення тиску в камері наповнення } p_H \text{ до тиску живлення } p_M;$$

$\varphi(\sigma_*)$  – функція витрати при критичному співвідношенні тисків під час наповнення камери

$$(\sigma_* = \frac{p_*}{p_M} - \text{критичне співвідношення тисків при наповненні камери; } p_* - \text{критичний тиск});$$

$k$  – показник адіабати.

Для визначення величини провідності  $\alpha$  впускного елемента системи повітророзподілу, через який стиснене повітря із пневмолінії надходить у камеру наповнення, варто використовувати наступну залежність:

$$\alpha = \frac{\mu f K p_M \varphi(\sigma) \sqrt{\frac{1}{RT_M}}}{\sqrt{p_M - p}}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрат системи повітророзподілу;

$f$  – площа робочих перерізів конструктивних елементів системи повітророзподілу, які забезпечують надходження стисненого повітря у робочу камеру;

$$K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} - \text{коефіцієнт;}$$

$p$  – тиск повітря у камері наповнення;

$\varphi(\sigma)$  – функція співвідношення тиску в камері та тиску живлення.

Коефіцієнт витрат системи повітророзподілу  $\mu$  для підкритичного режиму наповнення робочої камери:

$$\mu = \frac{(1 - \sigma_a) e^{-\frac{t}{\tau_0 V}}}{k K \varphi(\sigma) \tau_0 \sigma_{Hk} f \sqrt{RT_M}} \cdot \left[ \frac{(\sigma_{Hk} - \sigma_a) \varphi(\sigma_*)}{\varphi(\sigma)} + \frac{\sigma_a}{\sigma_{Hk}} \psi_1(\sigma_{Hk}) \right], \quad (3)$$

де  $\sigma_a = p_a / p_M$ ;

$$t = V / RT_M \alpha;$$

$\sigma_{Hk}$  – співвідношення тисків на завершальній фазі наповнення;

$\psi_1(\sigma_{Hk})$  – функція співвідношення тисків на завершальній фазі наповнення;

Функція співвідношення тисків при наповненні пневмокамери  $\psi_1(\sigma)$  при підкритичному режимі надходження енергоносія описується формулою:

$$\psi_1(\sigma) = \frac{2k}{k-1} \varphi(\sigma_*) \left( \sqrt{1 - \sigma_*^{\frac{k-1}{k}}} - \sqrt{1 - \sigma^{\frac{k-1}{k}}} + \sigma_* \right). \quad (4)$$

Динаміку зміни тиску в робочій камері змінного об'єму пневматичного приводу із пневмомеханічним керуванням при підкритичному режимі її спорожнення можна описати наступною формулою:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{BH}}{dt} = & (p_M - p_a) H(x, \dot{x}, t) \frac{\psi_2(\sigma_B)}{\sigma_B^{2k}} + (p_M - p_a) R(x, t) \times \\ & \times \frac{\frac{d\psi_2(\sigma_B)}{d\sigma_B} - \psi_2(\sigma_B) \cdot \frac{k-1}{2k} \cdot \sigma_B^{-\frac{k+1}{2k}}}{\sigma_B^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{d\sigma_B}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\frac{dp_{BH}}{dt}$  – зміна тиску в робочій камері змінного об'єму пневматичного приводу із пневмомеханічним керуванням при підкритичному режимі її спорожнення;

$H(x, \dot{x}, t) = \frac{dR(x)}{dt}$ , де  $R(x, t) = e^{-\frac{t}{\tau_{0c} F(s+x_{0c}-x)}}$  ( $\tau_{0c}$  – стала часу спорожнення;  $x_{0c}$  – початкова координата поршня-ударника, яка визначає компенсаційний об'єм камери спорожнення;  $s$  – хід поршня-ударника);

$\psi_2(\sigma_B)$  – функція співвідношення тисків при спорожненні пневмокамери;

$\sigma_B = \frac{p_a}{p_B}$  – безрозмірний тиск у камері спорожнення;

$p_B$  – тиск випуску у камері спорожнення.

Функція співвідношення тисків при спорожненні пневмокамери  $\psi_2(\sigma_B)$  при підкритичному режимі випуску відпрацьованого повітря описується формулою:

$$\psi_2(\sigma_B) = \sigma_{B*}^{\frac{k-1}{2k}} + \frac{k-1}{2k} \varphi(\sigma_*) \int_{\sigma_{B1}}^{\sigma_{B2}} \frac{d\sigma_B}{\sigma_B^{\frac{k+1}{2k}}} \cdot \varphi(\sigma), \quad (6)$$

де  $\sigma_{B*}$  – критичне співвідношення тисків при спорожненні пневмокамери;

$\varphi(\sigma_*)$  – функція витрати при критичному співвідношенні тисків під час спорожнення пневмокамери;

$\sigma_{B1}, \sigma_{B2}$  – безрозмірні тиски на початковому і кінцевому етапах процесу спорожнення;

$\varphi(\sigma)$  – функція співвідношення тисків при спорожненні пневмокамери.

Використовуючи результати вищенаведених досліджень, можна шляхом підбору розмірів конструктивних елементів системи повітророзподілу та робочих і компенсаційних камер істотно впливати на стійкість роботи пневмомеханічних приводів у підкритичному режимі.

Варто звернути також увагу на специфіку контактної взаємодії штока клапанного механізму впуску енергоносія та поршня-ударника. Від надійності спрацювання клапанного механізму під час цієї взаємодії залежить надійність роботи приводу та віброударної машини в цілому. Для зменшення сили ударного контакту штока і поршня-ударника на початковому етапі їх взаємодії та точкового контакту між ними на етапах впуску енергоносія у робочі камери торець штока виготовляється сферичним, а на торцях поршня-ударника виготовляються фаски.

Однак оскільки привод відноситься до високошвидкісних, а енергетичні характеристики віброударної машини, оснащеної ним, можуть істотно відрізнитися між собою, то руйнування або непридатність клапана внаслідок більш або менш інтенсивного зношування його штока може служити однією із найчастіших причин відмови у роботі пневмомеханічного приводу. При цьому зона дії динамічних напруг локалізується безпосередньо на сферичній частині торця штока клапана. Проведені дослідження показують, що у 80-85 % руйнування штока клапана відбувається внаслідок втоми через дію циклічних напруг.

Безпосередньо процес руйнування штока можна розглядати розподіленним на декілька етапів, першим з яких є певне пластичне деформування поверхні торця штока в результаті



ударної взаємодії з поршнем-ударником (яка відбувається з високою частотою протягом робочого циклу під час холостого ходу поршня-ударника), другим – поява мікротріщин у тілі штока в районі його сферичного торця, а третім – розростання зон (площ) пластичного деформування та/або поява більших за розмірами тріщин у тілі штока, що в кінцевому рахунку призводить до ускладнення/неможливості подальшої контактної взаємодії поршня-ударника та штока клапана або руйнування тіла штока клапана і відмови в роботі пневмомеханічного привода та віброударної машини в цілому.

Безумовно, з метою запобігання гірших наслідків експлуатацію віброударної машини доцільно припинити на початкових етапах руйнування штока клапана. Для цього, насамперед, шляхом проведення відповідних експериментальних потрібно визначити оптимальну кількість робочих циклів, після здійснення яких доцільно провести технічне обслуговування привода з метою заміни клапана механізму впуску енергоносія незалежно від стану тіла штока клапана та ступеня його зношення або етапу руйнування. Крім того, вищого ступеня надійності віброударних машин з пневмомеханічними приводами можна досягнути за рахунок дотримання жорстких вимог щодо виготовлення клапана механізму впуску енергоносія та поршня-ударника, їх матеріалу та термообробки.

Варто також зважати, що від розмірів конструктивних параметрів привода залежать величини робочих характеристик віброударної машини. Це також стосується і розглядуваних вище тіл ударної взаємодії – поршня-ударника та клапана механізму впуску енергоносія. Наприклад, від величини кута  $\beta$  нахилу фасок поршня-ударника залежить тривалість впуску стисненого повітря в робочі камери та лінійні розміри самого поршня-ударника (а, відповідно, його об'єм та маса), оскільки довжина  $l_{II}$  поршня-ударника:

$$l_{II} = l_{III} + 2l_{II\phi} = l_{III} + 2h_1 \operatorname{ctg} \beta, \quad (7)$$

де  $l_{III}$  – довжина циліндричної частини поршня-ударника;

$l_{II\phi}$  – довжина фаски поршня-ударника;

$h_1$  – висота фаски поршня-ударника.

Щодо діаметра штока клапана/клапанів  $d_{III}$ , то він впливає на величину/величини діаметра/діаметрів робочого вікна (робочих вікон)  $d_K$  впускного механізму:

$$d_K = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} - d_{III}, \quad (8)$$

де  $f$  – фактична площа (фактичні площі) прохідного перерізу (прохідних перерізів) робочого вікна (робочих вікон) впускного механізму:

$$f'_4 = f'_5 = \frac{\pi \psi_{KII} D^2}{4}, \quad (9)$$

де  $\psi_{KII} = 0,065 \dots 0,08$  – коефіцієнт відношення площі перерізу підвідних каналів до площі перерізу поршня-ударника;

$D$  – діаметр поршня-ударника.

**Висновок.** Отримані залежності дозволяють оцінити стійкість підкритичного режиму пневмомеханічних приводів, що особливо важливо на етапі їх проектних розробок. Крім того, запропоновані підходи до оцінки надійності клапанного механізму впуску енергоносія з позицій інтенсивності зношення штока клапана.

#### Інформаційні джерела

1. Педченко М.Н., Радченко Г.Ф., Федорец В.А. К расчету пневматических емкостей // Пневматика и гидравлика. – 1977. – Вып. 4. – С. 268-271.
2. Элементы и системы пневмоавтоматики / Т.К. Берендс, Т.К. Ефремова, А.А. Тагаевская, С.А. Юдицкий. – М.: Машиностроение, 1976. – 246 с.
3. Педченко М.Н., Радченко Г.Ф., Федорец В.А. Определение пропускной способности пневматической линии выхлопа // Гидропривод и гидропневмоавтоматика: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1975. – Вып. 12. – С. 48-55.
4. Расчет гидравлических и пневматических приводов гибких производственных систем / В.А. Федорец – К.: Вища шк., 1988. – 179 с.

**Стасюк В.М., к.т.н.**

Луцкий национальный технический университет

### **ДИНАМИКА ПОДКРИТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

*Задание повышения надежности пневматических машин ударного действия всегда оставалось и остается актуальным, в том числе и тех из них, которые оснащены приводами с пневмомеханическими системами управления. Это касается как сверхкритического, так и подкритического режимов их эксплуатации.*

*В этой публикации выполнены исследования подкритического режима. С целью установления устойчивости функционирования вышеупомянутого привода исследована динамика изменения давления в его рабочих камерах на фазах их наполнения и опорожнения с использованием постоянной времени инерционного звена, проводимости впускного элемента пневмомеханической системы управления, коэффициента расхода системы воздухораспределения, постоянных времени наполнения и опорожнения, а также функции соотношения давлений при наполнении пневмокамеры при подкритическом режиме поступления энергоносителя и функции соотношения давлений при опорожнении пневмокамеры при подкритическом режиме выпуска отработанного воздуха.*

*Используя полученные результаты исследований, можно путем рационального подбора размеров конструктивных элементов пневмомеханической системы воздухораспределения и параметров рабочих и компенсационных камер существенно влиять на устойчивость работы пневмомеханических приводов в подкритическом режиме.*

*Доказано, что в процессе проведения исследований следует также учитывать специфику контактного взаимодействия штока клапанного механизма с поршнем-ударником. Ведь от надежности срабатывания клапанного механизма в начале фаз впуска-выпуска энергоносителя существенно зависит надежность машины ударного действия во время ее эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *пневмопривод, подкритический режим, энергоноситель, сжатый воздух, поршень-ударник.*

**Stasiuk V.M.**

Lutsk National Technical University

### **DYNAMICS OF SUB-CRITICAL MODE OF PNEUMATIC MECHANICAL DRIVES OF PERCUSSION MASHINES**

*The task of improving the reliability of pneumatic percussion machines has always been and is still being topical including those equipped with drives with pneumatic mechanical control systems. This applies to both supercritical and sub-critical modes of operation.*

*This article studies the sub-critical regime. In order to establish the stability of the above-mentioned drive, the dynamics of pressure changes in its working chambers in the phases of their filling and emptying with the use of a steady time of the inertial link, the magnitude of the conduction of the inlet element of the pneumatic mechanical control system, the coefficient of flow of air distribution, and the stepping function, were investigated. The pressure ratio when filling the pneumatic chamber at sub-critical mode of energy supply and the function of the pressure ratio when emptying pneumatic chamber at sub-critical mode of exhaust air were examined.*

*Using the obtained research results, it is possible to significantly influence the stability of the operation of the pneumatic mechanical drives in the sub-critical mode by rationally selecting the sizes of the structural elements of the pneumatic mechanical air distribution system and the parameters of the working and compensation chambers.*

*It is proved that in the course of research it is also necessary to take into account the specificity of the contact interaction of the valve stem with the piston-drummer. After all, the reliability of the actuation of the valve mechanism at the beginning of the inlet-release phase of the energy carrier significantly depends on the reliability of the percussion machine during its operation.*

**Keywords:** *pneumatic drive, sub-critical mode, energy carrier, compressed air, piston-drummer.*

UDC 539.4.01: 004.42

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-15>Yu.S. Kholodnyak, Ph.D., A.A. Kostikov, Ph.D., S.V. Podlesny, Ph.D., S.V. Kaporovych, Ph.D.  
Donbass State Engineering Academy**ABOUT COMPUTER PROGRAMS FOR SIMPLIFIED METHODOLOGY OF COMPLEX ASSESSMENT OF STRENGTH OF TWO-BEAM BEAMS**

**Abstract.** Computer programs for calculation the strength of statically determinable double-support and cantilevered I-beams are based on the previously proposed concept of using safe factor spaces of I-beams and significantly simplify and speed up the calculation process. The programs are created in the Mathcad system and illustrated by a numerous of examples. Programs use unified beam schemes, which geometric and power parameters are set by the user. All further calculation is performed by computer in automatic mode. The computer determines the beam support reactions, builds its specific calculation scheme, depicts the diagrams of the shear forces and bending moments, determines the minimum of I-beam size that satisfies the strength conditions for normal, tangential and equivalent stresses. The completed software developments can be recommended to the students and engineers to use for educational purposes and engineering practice. It is recommended to add more functionality to the programs - to determine the deformations of beams - deflections and angles of rotation of sections, which will significantly expand the range of the considered tasks.

**Keywords:** I-beam, strength calculations, simplified methodology, end-to-end computer programs, calculation examples.

**Introduction and statement of the problem.** In the era of rapid technology growth, it becomes necessary high education institutions training of specialists with the solid basis of theoretical knowledge and practical skills to create more sophisticated new technology models. Important role plays improvement of the basic disciplines of engineering training aiming to add new knowledge that expands existing theoretical ideas.

One of the significant topic in the strengths of materials course that underpin engineering calculations is the question about the durability of the uni-planar bending structural elements of the bar-shaped structural elements (called beams) in the engineering, construction, and other industries operated in flat bending conditions.

Beams could be in various forms of cross sections, but the most widespread among them are beams of an I-bar profile (Fig. 1), because they combine economic advantages along with easy installation and operation.

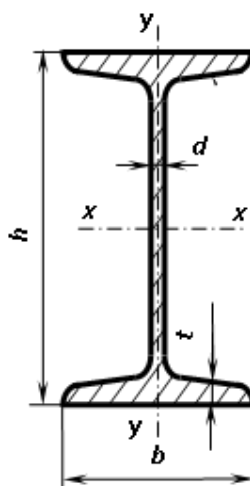


Fig. 1. I-beam (GOST 8239-89)

It is generally accepted [1-5, etc.] that in order to ensure reliable operation, beams must comply with the conditions of its strength at normal (1), tangent (2) and equivalent (3) stresses (normal, shearing and equivalent stress):

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]; \quad (1)$$

$$\tau_{max} \leq [\tau]; \quad (2)$$

© Yu.S. Kholodnyak, Ph.D., A.A. Kostikov, Ph.D., S.V. Podlesny, Ph.D., S.V. Kaporovych, Ph.D.

$$\sigma_{\max}^{eq} \leq [\sigma], \quad (3)$$

where  $[\sigma]$  and  $[\tau]$  are the permissible normal and tangent stresses respectively.

In traditional ("manual") calculations, full beam strength testing under conditions (1)-(3) is rather complicated and inefficient because it involves performing a number of graphical constructs and calculations that require appropriate skills and considerable time [6, 7]. As for the large amount of computer-aided computing tools available on the Internet (Abaqus FEA, ANSYS, COSMOSWorks, etc.), which are usually too expensive and complex enough to use, that makes those tools are practically unavailable for the most customers.

In the previously published papers [8, 9] on the basis of thorough theoretical studies, was proposed a simplified (graphical) technique for complex evaluation of the strength of I-beams, based on the so-called safe factor spaces of I-beams (fig. 2).

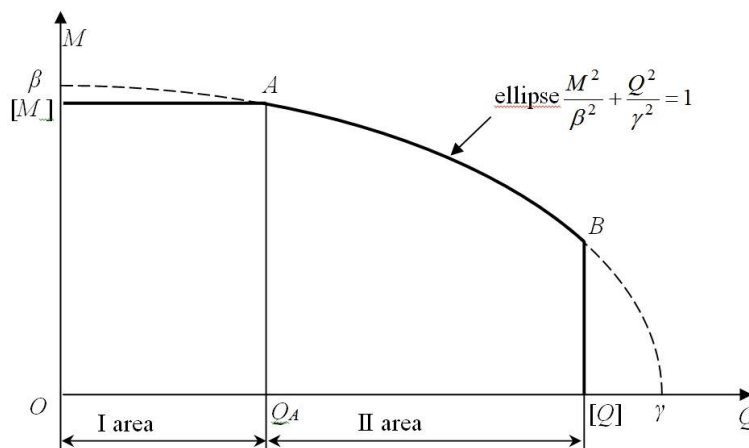


Fig. 2. Plot of the I-beam safe factor space.

Parameters of this space are  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $[M]$ ,  $[Q]$  that depend on the size (number) of the I-bar, its material and the accepted strength theory [8, 9].

Full strength of the beam in the new technique is ensured if all points with the coordinates  $Q$  (shear force) and  $M$  (bending moment) in the cross sections of the beam are located within the specified factor space. Thus, to provide the full strength test of a particular beam by this method, it is sufficient to have the created diagrams of  $Q$  and  $M$  and to draw its safe factor space.

This method is used in two modes: dialog and automatic.

In dialog mode, the calculator builds diagrams of  $Q$  and  $M$  "manually" or using the appropriate computer programs, if any. Then the calculator enters the data from the  $Q$  and  $M$  diagrams in the cross sections of the beam into the computer and runs special program to determine the I-beam number that satisfies the conditions of strength (1)-(3).

At the automatic mode, the calculator only enters the input data on the dimensions and loads of the beam, and all the necessary calculations and drawings are performed by computer program.

**The aim of the work.** The purpose of this work is to create end-to-end computer programs to fully calculate the statically determined two support and cantilever beam by statically determined two support and cantilever beam using a simplified (graphical) technique.

**Results of the work.** Both of these programs are created on the Mathcad platform. They are significantly different from each other only at the input stage.

To set the output data of the **two-beam beams**, they are offered a unified scheme, shown in Figure 3. On this basis, any specific dimensions and loads can be reproduced.

There are two variants of the cantilever beam unified circuits: one for rigid attachment on the right (Fig. 4) and the other for support on the left (Fig. 5).

Positive directions of loads and reactions are supported by plus signs for all unified schemas.

Each type of load can be repeated several times ( $i = 1, 2, \dots$ ). In the working versions of the programs used in the examples below,  $i = 1, 2$ .

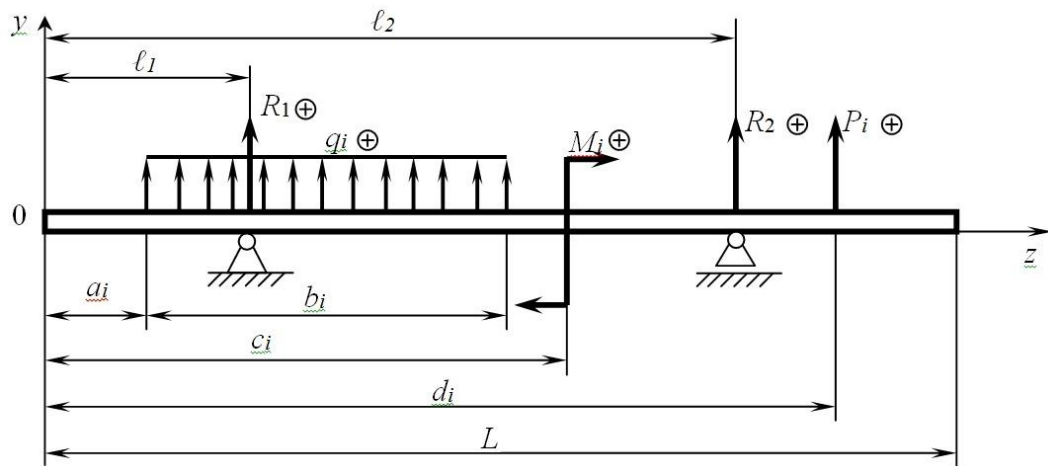


Fig. 3. Unified two support beam plot.

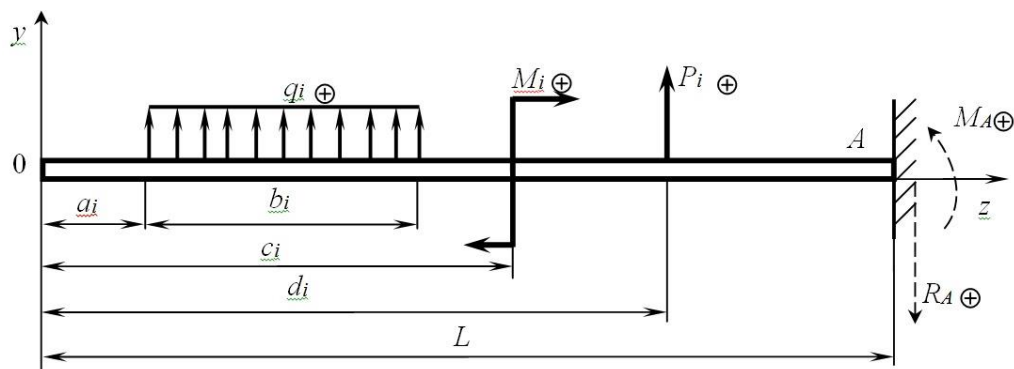


Fig. 4. Unified cantilever beam plot with right attachment.

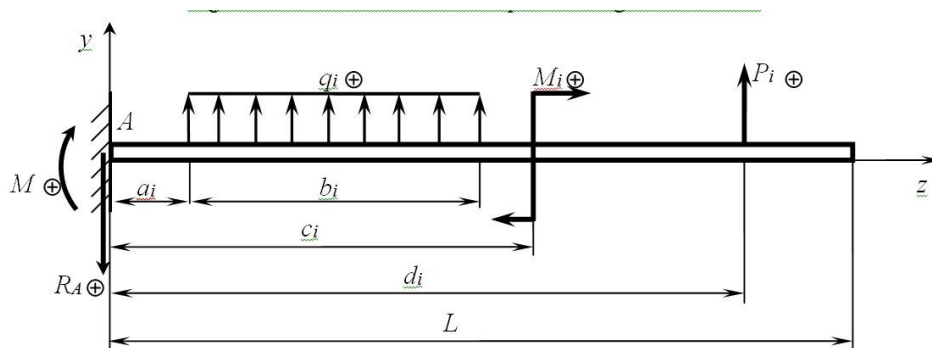


Fig. 5. Unified cantilever beam plot with left attachment.

Both programs determine the support reactions, build the shear force and bending moment diagrams, depict safe factor spaces with the points plotted on them, choose the correct numbers of I-beam sizes, provide evidence that the detected I-number is the smallest one that satisfies all strength conditions.

Program algorithms are based on formulas to calculate the support reactions, the dependences of Q and M values on the coordinate z, the parameters of safe factor spaces for all numbers of I-thaws according to GOST 8239-89 (table 1). These parameters was calculated by using the formulas in [8, 9] for the most common double-Taurus material - steel Art. 3 and the third strength theory, which is more reliable than the fourth because it provides smaller dimensions of safe factor spaces.

Table 1

I-beam safe factor space parameters (steel Art.3,  $[\sigma] = 160 \text{ MPa}$ , third strength theory)

| I-beam sizes | $\beta, \text{ kN}\cdot\text{m}$ | $\gamma, \text{ kN}$ | $[M], \text{ kN}\cdot\text{m}$ | $[Q], \text{ kN}$ |
|--------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| 10           | 7.402                            | 37.758               | 6.352                          | 30.991            |
| 12           | 10.626                           | 49.714               | 9.344                          | 39.881            |

|     |         |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| 14  | 14.643  | 60.227  | 13.072  | 47.911  |
| 16  | 19.346  | 70.878  | 17.440  | 56.051  |
| 18  | 25.201  | 81.860  | 22.880  | 64.658  |
| 18a | 28.005  | 80.166  | 25.440  | 64.971  |
| 20  | 32.140  | 93.137  | 29.440  | 73.600  |
| 20a | 35.536  | 91.513  | 32.480  | 74.077  |
| 22  | 40.276  | 106.648 | 37.120  | 84.091  |
| 22a | 44.154  | 104.441 | 40.640  | 84.285  |
| 24  | 50.100  | 120.338 | 46.240  | 95.097  |
| 24a | 55.172  | 118.225 | 50.720  | 95.640  |
| 27  | 64.026  | 147.557 | 59.360  | 114.515 |
| 27a | 70.513  | 144.836 | 65.110  | 115.284 |
| 30  | 81.030  | 180.046 | 75.520  | 137.373 |
| 30a | 89.361  | 176.713 | 82.880  | 138.548 |
| 33  | 102.367 | 215.074 | 95.520  | 162.549 |
| 36  | 127.657 | 252.820 | 118.880 | 189.787 |
| 40  | 163.097 | 316.526 | 152.480 | 232.241 |
| 45  | 210.216 | 392.515 | 196.960 | 281.236 |
| 50  | 270.712 | 494.005 | 254.240 | 345.828 |
| 55  | 346.380 | 605.383 | 325.600 | 416.990 |
| 60  | 435.470 | 727.747 | 409.600 | 494.526 |

We will illustrate the created programmes with the following examples.

**Example 1.** For a given fixed beam (Fig. 6), determine the I-beam size, sufficient to ensure its full strength.

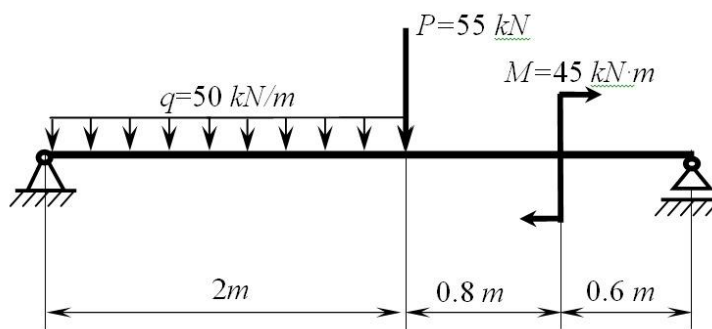


Fig. 6. The beam plot to example 1

### Solution

1. Input of concentrated forces, moments of couples and their location:

Enter the concentrated forces  $P$ , its position  $d$ , moments of couples  $M$  and its positions  $c$

$$P := \begin{pmatrix} -55 \\ 0 \end{pmatrix} \text{kN} \quad d := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad M := \begin{pmatrix} 45 \\ 0 \end{pmatrix} \text{kN}\cdot\text{m} \quad c := \begin{pmatrix} 2.8 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m}$$

2. Input of the length of beam, the support positions, the distributed loads, its positions and lengths:

Enter the distributed loads  $q$ , its positions  $a$ , its length  $b$ , the length of the beam  $L$  and the support positions on the beam  $l_1$  та  $l_2$

$$q := \begin{pmatrix} -50 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad b := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad L := 3.4\text{m} \quad l_1 := 0\text{m} \quad l_2 := 3.4\text{m}$$

3. Determination of the support reaction forces of the beam:

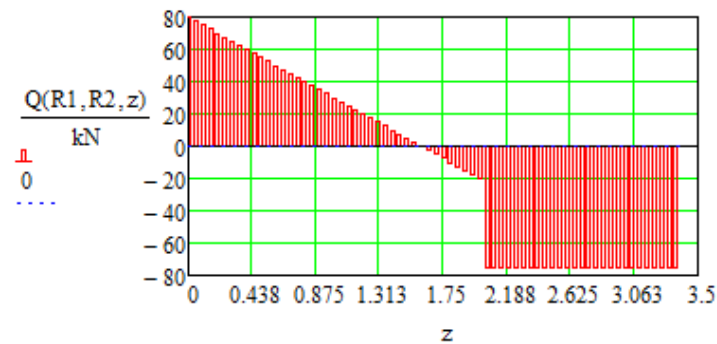
$$R2 := \frac{1}{(l_2 - l_1)} \left[ \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} M_i - \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} [P_i \cdot (d_i - l_1)] - \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot b_i \cdot \left( a_i + \frac{b_i}{2} - l_1 \right) \right] \right]$$

$$R2 = 7.5 \times 10^4 \text{ N}$$

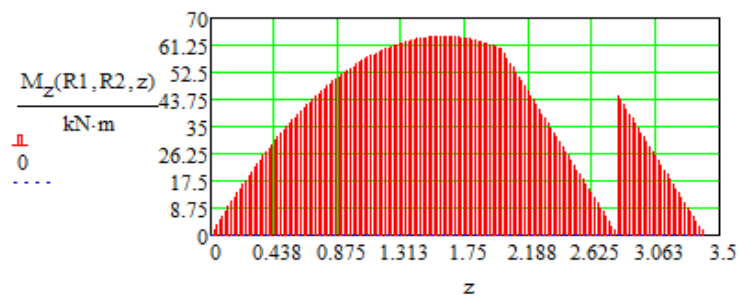
$$R1 := \frac{1}{(l_2 - l_1)} \left[ - \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} M_i + \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} [P_i \cdot (d_i - l_2)] - \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot b_i \cdot \left( l_2 - a_i - \frac{b_i}{2} \right) \right] \right]$$

$$R1 = 8 \times 10^4 \text{ N}$$

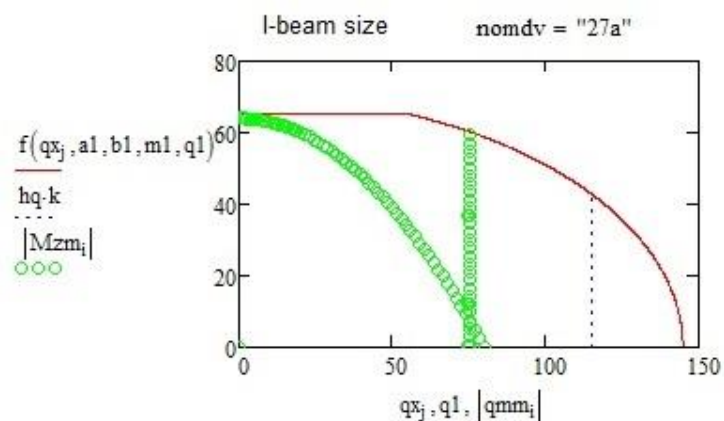
4. Plot of the shear force diagram:



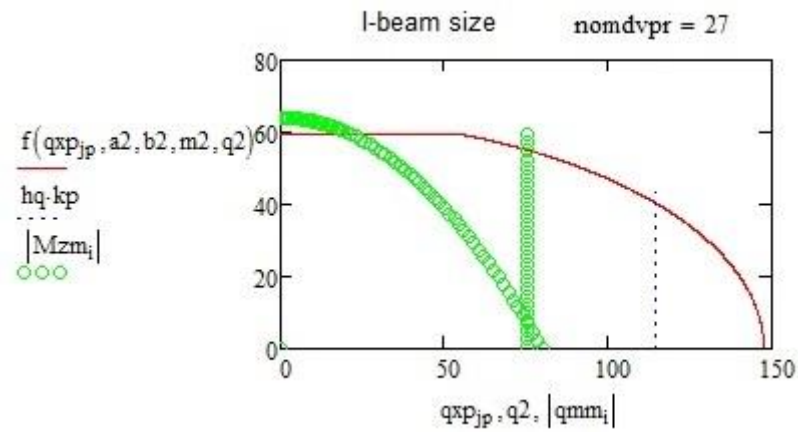
5. Plot of the bending moment diagram:



6. Determination of the I-beam size:



7. Comparison with the previous I-beam size:



**Example 2.** For the beam shown in Fig. 7, determine the required I-beam size to ensure its full strength

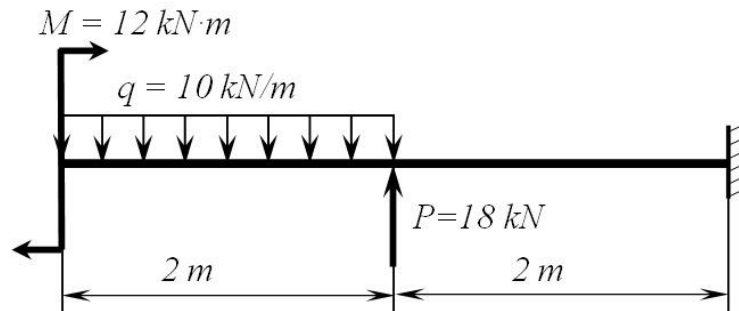


Fig. 7. The beam plot to the example 2

### Solution

1. Input of concentrated forces, moments of couples and its positions:

Enter the concentrated forces  $P$ , its positions  $d$ , moments of couple  $M$  and its position  $c$

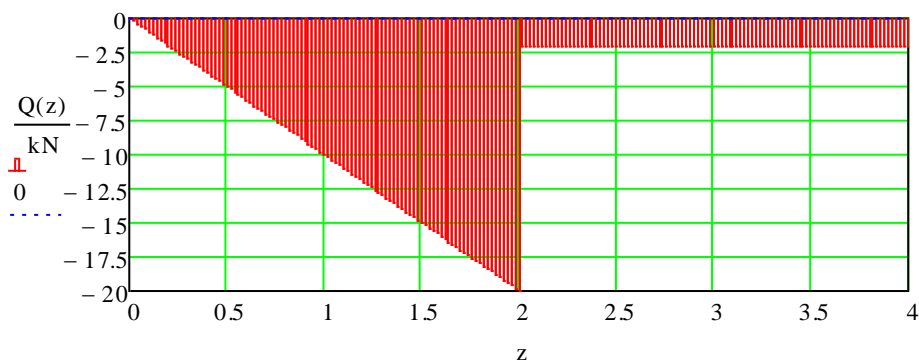
$$P := \begin{pmatrix} 18 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad d := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m} \quad M := \begin{pmatrix} 12 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ kN}\cdot\text{m} \quad c := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m}$$

2. Input of the length of beam, the distributed loads, its positions and lengths and the position of the beam attachment:

Enter the distributed loads  $q$ , its positions  $a$ , its lengths  $b$ , the beam length  $L$  the attachment position  $lz$

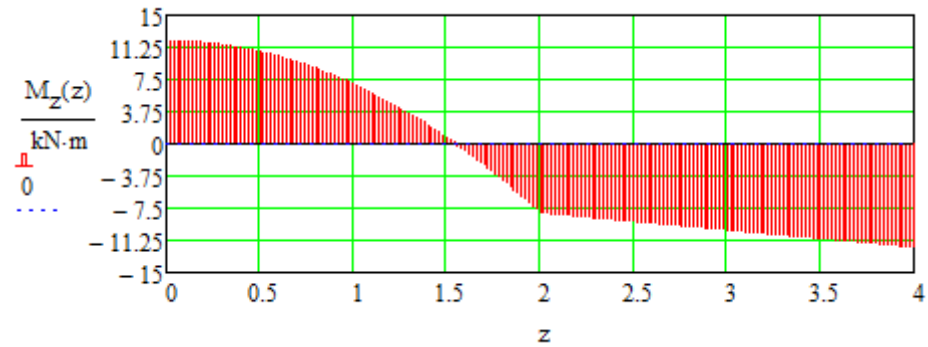
$$q := \begin{pmatrix} -10 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m} \quad b := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m} \quad L := 4 \text{ m} \quad lz := L$$

3. Plot of the shear force diagram:

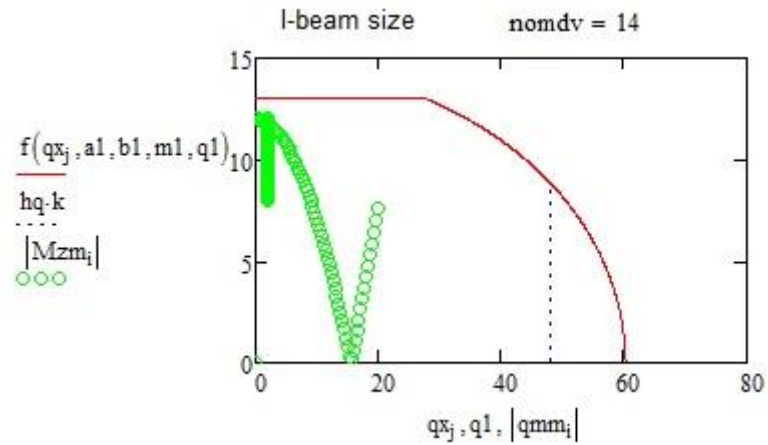


4. Plot of the bending moment diagram:

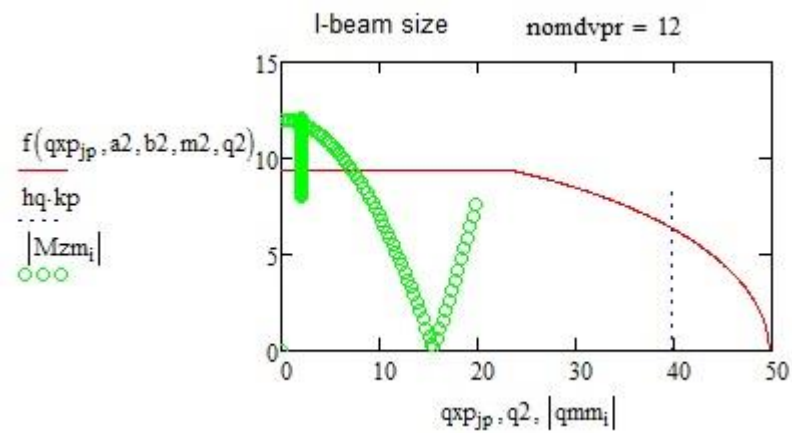




5. Determination of the I-beam size:



6. Comparison with the previous I-beam size:



**Example 3.** The beam plot for calculation is shown in Fig.8. Determine I-beam size to ensure its full strength.

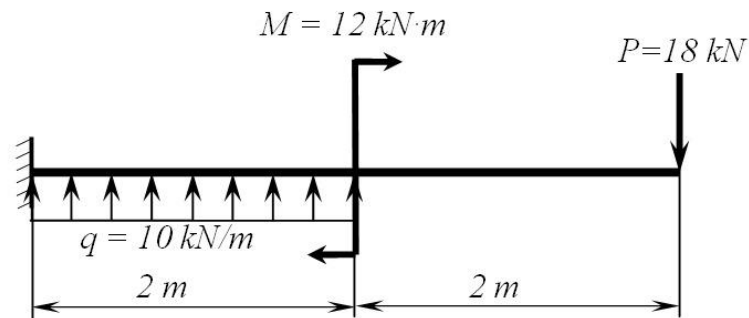


Fig. 8. The beam plot to example 3

**Solution**

1. Input of concentrated forces, moments of couples and its positions:

Enter the concentrated forces P, its positions d, moments of couple M and its position c

$$P := \begin{pmatrix} -18 \\ 0 \end{pmatrix} \text{kN} \quad d := \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad M := \begin{pmatrix} 12 \\ 0 \end{pmatrix} \text{kN}\cdot\text{m} \quad c := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m}$$

2. Input of the length of beam, the distributed loads, its positions and lengths and the position of the beam attachment:

Enter the distributed loads q, its positions a, its lengths b, the beam length L the attachment position lz

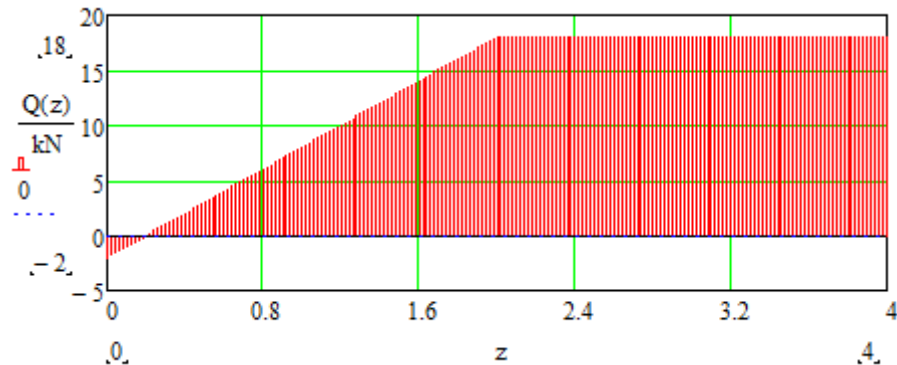
$$q := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad b := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{m} \quad L := 4 \text{m} \quad lz := 0$$

3. Determination of support reaction force and moment:

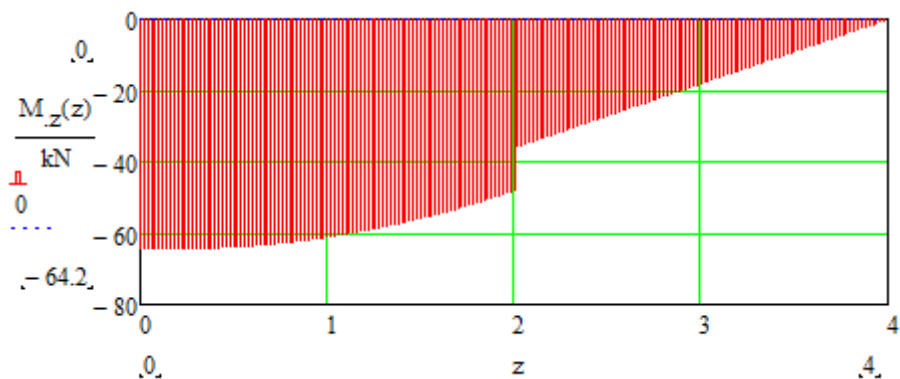
$$R_A := \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} (q_i \cdot b_i) + \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} (P_i) \quad R_A = 2 \times 10^3 \text{N}$$

$$M_A := \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot b_i \cdot \left( a_i + \frac{b_i}{2} \right) \right] + \sum_{i=1}^{\text{rows}(P)} (P_i \cdot d_i) - \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} (M_i) \quad M_A = -6.4 \times 10^4 \text{J}$$

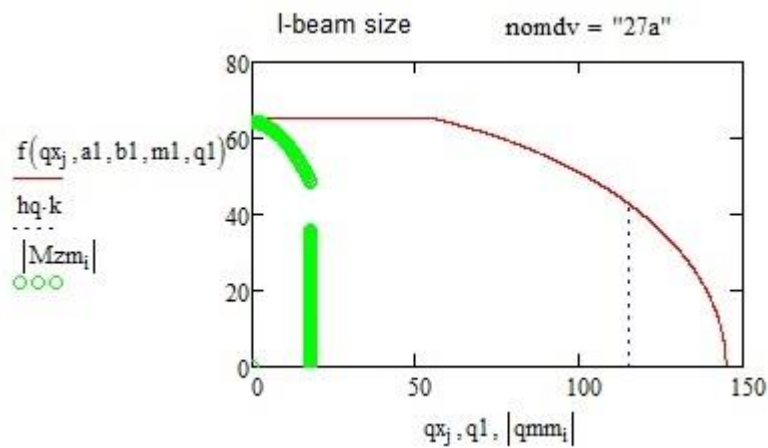
4. Plot of the shear force diagram:



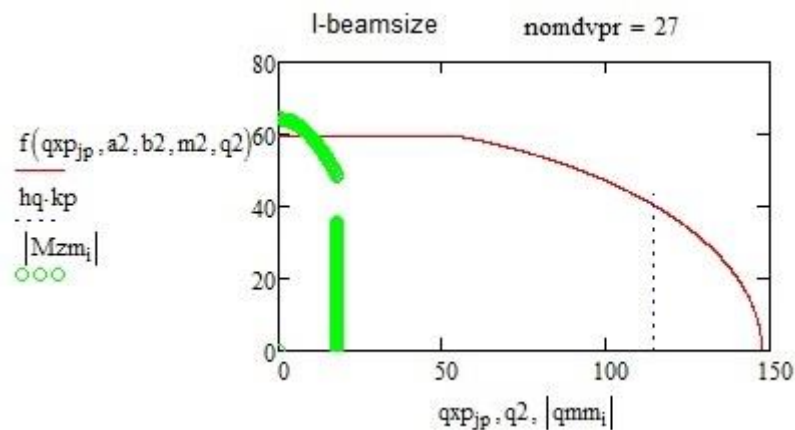
5. Побудова епюри згинальних моментів:



6. Determination of the I-beam size:



6. Comparison with the previous I-beam size:



**Conclusions.** Computer programs are created in Mathcad and illustrated with a number of examples to calculate the strength of statically defined two-point and cantilever beams. These programs are based on the previously proposed concept of using secure quotient spaces of double-Taurus, which significantly simplifies and speeds up the computation process.

The completed developments can be recommended to the students and engineers to use for educational purposes and engineering practice.

The algorithm to define deformations of beams - bends and angles of cross section, which will allow to expand significantly the range of solved problems is also should be added to the created programs.

### References

1. Pisarenko G.S. Strength of materials: of High.Educ./ G.S.Pisarenko,O.L. Kvitka,E.S.Umanskiy.- K.:High Scool.,2004.-655p.
2. Kalinovskaya, T.G. Strength materials: Tutorial / T.G.Kalinovskaya Handbook for Inst, N.A.Drozdova, A.T.Ryabova –Naydan – Krasnoyarsk: Siberia Federal University, 2016 – 164p.
3. Chakarbarti M. Strength Of Materials / M. Chakarbarti. – S. K. Kataria & Sons, 2009. – 1000 p. ISBN 8185749302, 9788185749303
4. Bansal R. K. A Textbook of Strength of Materials / R. K. Bansal. – Laxmi Publications, 2010. – 1106 p. ISBN 8131808149, 9788131808146
5. Purushothama Rai. P. Strength of Materials / P.Rai. Purushothama, V.Ramasamy.–Pearson India, 2012. – 1039 p. ISBN 8131798895, 9788131798898.
6. Кутовий Л. В. Збірник розрахунково – графічних завдань з курсу "Опір матеріалів" (для студентів всіх механічних спеціальностей денної форми навчання) / Л. В. Кутовий [та ін.]. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – 220 с.
7. Каюмов Р.А. Расчёт балки на прочность и жёсткость при прямом поперечном изгибе: Методические указания для выполнения расчётно – графического задания / Р.А. Каюмов, И.З. Мухамедова, Д.Е. Страхов. – Казань: КГАСУ, 2009. – 24 с.
8. Холодняк Ю.С. Совершенствование методики прочностного расчёта двутавровой балки и её изложения в курсах технических дисциплин / Ю.С. Холодняк, А.В. Периг, И.А. Матвеев //

Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – Пермь: ПНИПУ, 2012. – С. 77-90.

9. Холодняк Ю. С. Развитие методологии прочностных расчетов двутавровых балок / Ю. С. Холодняк, А. В. Периг, С. В. Капорович // Научный Вестник ДГМА : Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (17Е). – С. 103 –114.

**Холодняк Ю.С., Костіков О.А., Подлесний С.В., Капорович С.В.**

Донбаська державна машинобудівна академія

### **ПРО КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ ДО СПРОЩЕНОЇ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК**

*Створено в системі Mathcad і проілюстровано рядом прикладів наскрізні комп'ютерні програми розрахунків на міцність статично визначуваних двохопорних і консольних двутаврових балок, які базуються на раніше запропонованій концепції використання безпечних факторних просторів двутаврів і суттєво спрощують і прискорюють процес обчислень. Програми використовують уніфіковані схеми балок, геометричні й силові параметри яких задає користувач. Увесь подальший розрахунок виконується комп'ютером в автоматичному режимі. Комп'ютер визначає опорні реакції балки, будує її конкретну розрахункову схему, також епюри поперечних сил і згинальних моментів, визначає мінімальний номер двутавра, який задовольняє умови міцності за нормальними, дотичними і еквівалентними напруженнями. У подальшому планується створення аналогічних програм для балок із швелерів. Виконані розробки можуть бути рекомендовані студентам та виробничим фахівцям для використання в навчальних цілях й інженерній практиці. Створені програми доцільно доповнити можливостями визначення деформацій балок – прогинів і кутів повороту перерізів, що дозволить суттєво розширити коло розв'язуваних задач.*

**Ключові слова:** двутаврові балки, розрахунки на міцність, спрощена методика, наскрізні комп'ютерні програми, приклади розрахунків.

**Холодняк Ю.С., Костиков А.А., Подлесный С.В., Капорович С.В.**

Донбасская государственная машиностроительная академия

### **РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ УПРОЩЁННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА НА ПРОЧНОСТЬ ДВОТАВРОВЫХ БАЛОК**

*Созданы в системе Mathcad и проиллюстрированы рядом примеров сквозные компьютерные программы расчётов на прочность статически определимых двухопорных и консольных двутавровых балок, которые базируются на ранее предложенной концепции использования безопасных факторных пространств двутавров и существенно упрощают и ускоряют процесс вычислений. Программы используют унифицированные схемы балок, геометрические и силовые параметры которых задает пользователь. Весь дальнейший расчёт выполняется компьютером в автоматическом режиме. Компьютер определяет опорные реакции балки, строит её конкретную расчётную схему, изображает эпюры поперечных сил и изгибающих моментов, устанавливает минимальный номер двутавра, удовлетворяющий условия прочности по нормальным, касательным и эквивалентным напряжениям. Выполненные разработки могут быть рекомендованы студентам и производственным специалистам для использования в учебных целях и инженерной практике. Созданные программы целесообразно дополнить возможностями определения деформаций балок – прогибов и углов поворота сечений, что позволит существенно расширить круг решаемых задач.*

**Ключевые слова:** двутавровые балки, расчёты на прочность, упрощённая методика, сквозные компьютерные программы, примеры расчетов.

UDC 539.3/6

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-16>

Yu.S. Kholodnyak, Ph.D., S.V. Podlesny, Ph.D., S.V. Kaporovych, Ph.D., Ye.D. Korotenko, Ph.D.

Donbass State Engineering Academy

**ON APPLICATION OF A SIMPLIFIED TWO-DIMENSIONAL MODEL OF FORCED OSCILLATIONS TO THE POWER ANALYSIS OF FLAT STEELWORKS**

**Abstract.** An analysis of existing methods of power calculation of steelworks under the influence of forced oscillations is performed. When considering the forced oscillations of flat steelworks, two-dimensional models are used, which are complex for wide practical use. Their implementation requires in-depth mathematical training and complex computational tools. The aim of this work is to develop a simplified two-dimensional mathematical model of forced oscillations of flat steelworks with following use of this model in power calculations. The mathematical model proposed in this paper describes oscillations of a weightless steelwork with a point mass of simultaneous action in vertical and horizontal harmonic disturbing forces acting on them. The model is based on the method of forces, establishes a link between the movements of the steelworks and the forces that act on them. Together with the model the dependences for calculating the resonant frequencies of the oscillatory system are obtained. The performed developments allow to determine the dynamic characteristics of the oscillatory process and to calculate a steelwork strength, stiffness and stability.

**Keywords:** plane steelworks, forced oscillations, mathematical model, resonant frequencies, power calculations.

**Introduction and statement of the problem.** Scientific and technological progress requires the designers to apply increasingly sophisticated methods of calculation regarding the strength and power parameters of the products created. Such requirements are most relevant for structures subject to external loads variable in time.

In industry rod structures are considerably widespread, such as beams, flat frameworks and steelworks, employed under conditions of forced oscillations, i.e. arising from the action of so-called disturbing forces. Most often the source of such forces is the work of various equipment installed on these structures – pumps, presses, pile drivers, etc. The disturbing forces result from the movement of the center of mass of such equipment and they are of periodic, often harmonious, nature.

Constructions under forced oscillations undergo additional (dynamic) forces and stresses, which in some cases reach considerable quantities. Hence is the importance of adequate consideration of such structures in power calculations.

As a rule, forced vibrations of a weightless beam with a fixed point mass are analyzed in the educational and methodical literature on the resistance of materials [1–3]. This (simplified) model of the oscillatory system is a single-dimensional one. In spite of its simplicity, it provides acceptable accuracy of power calculations for general practice. Along with it, more sophisticated one-dimensional models are also offered in university courses of resistance of materials and structural mechanics, which take into consideration point mass and beam weight [4–6]. However, the proposed calculation methods for widespread practical application are quite complex, since they require advanced mathematical training, which usually goes beyond the curriculum of higher engineering institutions.

Forced vibrations of flat frameworks and steelworks are generally considered in University courses of construction mechanics [7–13]; wherein complex two-dimensional models are used, which are also not acceptable for widespread practical use. This requires simpler calculation techniques which do not require special mathematical training but still provide acceptable practice for accuracy.

Such a two-dimensional model of forced oscillations was created by the authors of the paper and adapted to calculations of the strength of flat frames [14, 15].

**Results of the work.** In this model the oscillating mass and oscillation source is a statically unbalanced rotor of an electric motor, but other options are also possible.

When operating such an engine a centrifugal force of inertia  $\bar{H}$  arises, which is a disturbing force of oscillation. It rotates with the rotor of the engine with circular frequency  $\omega$ . In addition to it the force of gravity  $m\bar{g}$  and the inertia forces  $\bar{\Phi}_1$  and  $\bar{\Phi}_2$  as well as the resistance of the medium  $\bar{F}_1$  and  $\bar{F}_2$  and reaction of the elastic element  $\bar{R}_1$  and  $\bar{R}_2$  influence the oscillating mass  $m$ . Fluctuations occur around the position of static equilibrium – point  $O$  (Fig. 1).

© Yu.S. Kholodnyak, S.V. Podlesny, S.V. Kaporovych, Ye.D. Korotenko

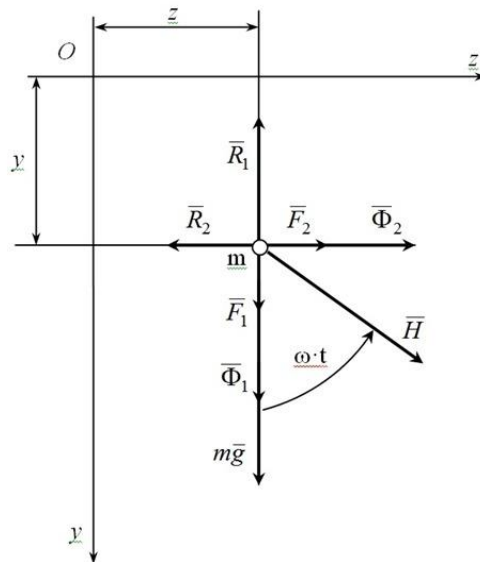


Figure 1. Scheme of oscillating mass load

According to the D'Alembert principle [4], the oscillating mass at any time is in kinetostatic equilibrium under the action of the force applied to it (see Fig. 1). The vector equation of this equilibrium is:

$$m\bar{g} + \bar{R}_1 + \bar{R}_2 + \bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{H} = 0. \quad (1)$$

The differential equations of motion of an oscillating mass are transformed projections on the axis of coordinates of the vector equation (1):

$$m \cdot \ddot{y} + \mu \cdot \dot{y} + f_1(y, z) = mg + H \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2)$$

$$m \cdot \ddot{z} + \mu \cdot \dot{z} + f_2(y, z) = H \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3)$$

where  $\dot{y}$  and  $\dot{z}$  are current projections of the velocity of the oscillating mass on the corresponding axes of coordinates;

$\ddot{y}$  and  $\ddot{z}$  are current projections of the acceleration of the oscillating mass on the corresponding axes of coordinates;

$\mu$  is the coefficient of the medium resistance;

$t$  is the time from the start of the movement, i.e. the exit of mass  $m$  from the position of static equilibrium;

$$f_1(y, z) = R_1 = P_1 = mg + \frac{z}{\delta_{21}} - \frac{y \cdot \delta_{21} - z \cdot \delta_{11}}{\delta_{21}^2 - \delta_{22} \cdot \delta_{11}} \cdot \frac{\delta_{22}}{\delta_{21}}; \quad (4)$$

$$f_2(y, z) = R_2 = P_2 = \frac{y \cdot \delta_{21} - z \cdot \delta_{11}}{\delta_{21}^2 - \delta_{22} \cdot \delta_{11}}; \quad (5)$$

where  $P_1$  and  $P_2$  are the forces with which the oscillating mass influences on the elastic element;

$\delta_{11}$ ,  $\delta_{22}$ ,  $\delta_{12} = \delta_{21}$  are peculiar stiffness indices of the elastic element; for the frameworks, they are determined by Vereshchagin's rule or by the universal formula of multiplication of trapeziums (formula of extreme ordinates), using the corresponding graphs of bending moments [16].

Differential equations (2) and (3) require implication of any of the existing computing systems for their integration. The simplest and most acceptable in this case is the Mathcad system, which allows performing all the necessary calculations. To integrate these equations, it is convenient to accept zero initial conditions, as well as the condition  $\omega_0 = \omega$ , i.e. consider the period of acceleration of the motor to be absent.

The numerical integration of these equations determines implicitly the laws of motion of oscillating mass  $y = y(t)$  and  $z = z(t)$ , and through them, the laws of change of forces of the action of oscillating mass on an elastic element  $P_1 = P_1(t)$  and  $P_2 = P_2(t)$  and their maximum values, which further serve to evaluate the strength of the structure.

The created model also allows to determine the circular frequencies of natural oscillations of the structure, which is called *resonant frequencies* for brevity. They are calculated by the formula:

$$\omega_{1,2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m \cdot (\delta_{11} + \delta_{22}) \pm m \cdot \sqrt{(\delta_{11} + \delta_{22})^2 - 4 \cdot (\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12}^2)}}} \quad (6)$$

Apparently, application of the outlined model is not limited to frameworks. This model is a versatile one and is fundamentally acceptable to any of the oscillating systems with point mass and non-weighted elastic element of arbitrary construction with two degrees of freedom.

The purpose of this work is to adapt the model to the power calculations of flat steelworks under conditions of forced oscillations.

The main difference between steelworks and frameworks is that the rods in the steelworks are connected to each other in the so-called hubs by means of hinges, and the frameworks are rigidly fastened, making the rods of the steelworks stretch and contract, whereas the frameworks (if longitudinal forces not taken to attention) are under conditions of flat bending. Therefore, the steelworks stiffness indices, in contrast to those of the frames, in which these indices depend mainly on bending moments, are determined by the longitudinal force  $N$ .

The differences of steelworks should also include the possibility of longitudinal bending in compressed rods, that is, loss of stability, which inevitably renders the structure unusable for further use.

Dependencies arising from Vereshchagin's rule for longitudinal force diagrams are used to determine steelwork rigidity [16]:

$$\begin{cases} \delta_{11} = \frac{1}{E \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{N}_i^2 \cdot \ell_i; \\ \delta_{22} = \frac{1}{E \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{N}'_i)^2 \cdot \ell_i; \\ \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{E \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot \bar{N}'_i \cdot \ell_i, \end{cases} \quad (7)$$

where  $i$  is the rod's number;

$n$  is the number of rods in the steelwork;

$\bar{N}_i$  is the force in the  $i$ -th rod from the action of vertical unit force  $P_1=1$ , which is applied to the steelwork at the location of the oscillating mass;

$\bar{N}'_i$  is the force in the  $i$ -th rod from the action of horizontal unit force  $P_2=1$  applied to the same place;

$\ell_i$  is the length of the  $i$ -th rod;

$E$  is elasticity modulus of rod material;

$F$  is the cross-sectional area of the steelwork rods.

Note that steelworks located in the vertical plane and having the same cross-sectional shape and cross-sectional dimensions are considered here.

To determine the values  $\bar{N}_i$  and  $\bar{N}'_i$ , it is necessary to pre-calculate the reference reactions of the steelwork, and then apply the cut-off method or section method proposed by Ritter [7].

Having identified the pair of forces thus indicated in each of the rods and having analyzed the combinations of their values, it is necessary to identify the rods which are potentially dangerous from the point of view of compression strength and resistance. This is where attention should be paid to at the appropriate stages of power calculations.

The specificity and details of testing and design calculations of flat steelworks for strength and stability using a simplified two-dimensional forced vibration model will be illustrated by the following examples.

**Example 1.** Ignoring the resistance of the medium, verify the strength, stability and resonance of a flat steelwork (Fig. 2) made of pipes with an outer diameter  $d = 100 \text{ mm}$  and a wall thickness  $s=5 \text{ mm}$ . Pipe material is steel *St.3*,  $[\sigma] = 160 \text{ MPA}$ . The mass of a static unbalanced electric motor installed on the steelwork is  $m = 2000 \text{ kg}$ , its circular speed  $\omega = 31.4 \text{ s}^{-1}$  (300 rpm), the modulus of the force generated is  $H = 0.3 \text{ mg}$ .

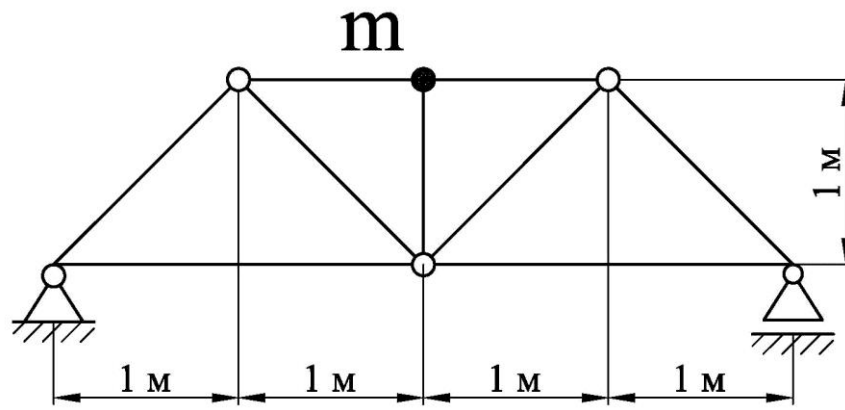
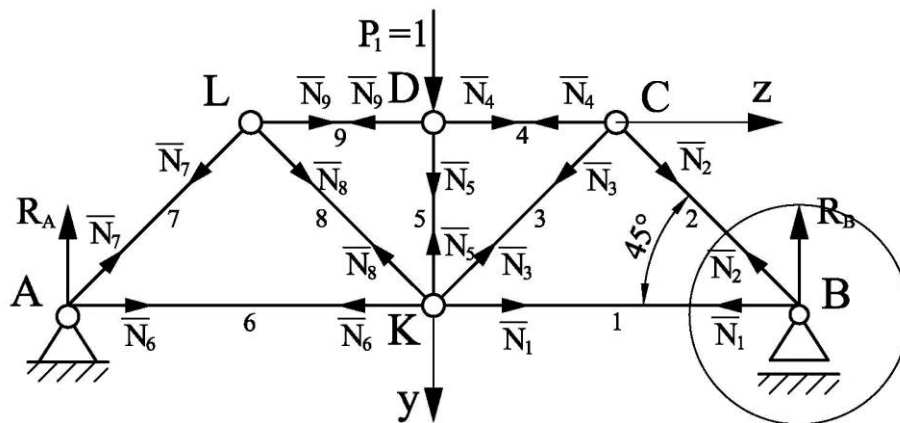


Figure 2. Scheme of the steelwork

## Solution

1. The number of rods and nodal points are denoted on the scheme of the steelwork, the length of the rods are determined:  $l_1 = l_6 = 2 m$ ,  $l_2 = l_3 = l_7 = l_8 = 1.41 m$ ,  $l_4 = l_5 = l_9 = 1 m$  (Fig. 3).

Figure 3. Diagram for determining the force at the rods of steelworks from the action of a single force  $P_I=1$ 

2. Vertical single force  $P_I=1$  is applied to the steelwork at the location of the engine (node D) and the reaction of the steelwork  $R_A$  and  $R_B$  are determined from this force (see Fig. 3):

$$\begin{cases} \sum M_A = -P_I \cdot 2 + R_B \cdot 4 = 0; & R_B = \frac{P_I \cdot 2}{4} = \frac{1 \cdot 2}{4} = 0.5; \\ \sum M_B = P_I \cdot 2 - R_A \cdot 4 = 0; & R_A = \frac{P_I \cdot 2}{4} = \frac{1 \cdot 2}{4} = 0.5. \end{cases}$$

Verification:  $\sum P_y = P_I - R_A - R_B = 1 - 0.5 - 0.5 = 0$ . Responses are correct.

$$\begin{cases} \sum P_y = -R_B - \bar{N}_2 \cdot \sin 45^\circ = 0; & \bar{N}_2 = -\frac{R_B}{\sin 45^\circ} = -\frac{0.5}{0.71} = -0.71; \\ \sum P_z = -\bar{N}_1 - \bar{N}_2 \cdot \cos 45^\circ = 0; & \bar{N}_1 = -\bar{N}_2 \cdot \cos 45^\circ = 0.71 \cdot 0.71 = +0.5. \end{cases}$$

Signs indicate that the rod 1 is stretched and the rod 2 is compressed.

4. Consistently transfer to nodes C, D, L, A and similarly determine all other forces:  $\bar{N}_3 = +0.71$ ;  $\bar{N}_4 = -1$ ;  $\bar{N}_5 = +1$ ;  $\bar{N}_9 = -1$ ;  $\bar{N}_8 = +0.71$ ;  $\bar{N}_7 = -0.71$ ;  $\bar{N}_6 = +0.5$ .

5. For verification, equilibrium of the node K is considered:



$$\begin{cases} \sum P_y = \bar{N}_5 - \bar{N}_3 \cdot \sin 45^\circ - \bar{N}_8 \cdot \sin 45^\circ = 1 - 0.71 \cdot 0.71 - 0.71 \cdot 0.71 = 1 - 0.5 - 0.5 = 0; \\ \sum P_z = \bar{N}_1 - \bar{N}_6 + \bar{N}_3 \cdot \cos 45^\circ - \bar{N}_8 \cdot \cos 45^\circ = 0.5 - 0.5 + 0.71 \cdot 0.71 - 0.71 \cdot 0.71 = \\ = 0.5 - 0.5 + 0.5 - 0.5 = 0. \end{cases}$$

Forces in all rods are found correctly.

6. When horizontal unit force  $P_2 = 1$  is applied to the steelwork at the location of the engine (node D) and from the reaction of the steelwork and the force in the rods is determined in the same way (Fig. 4).

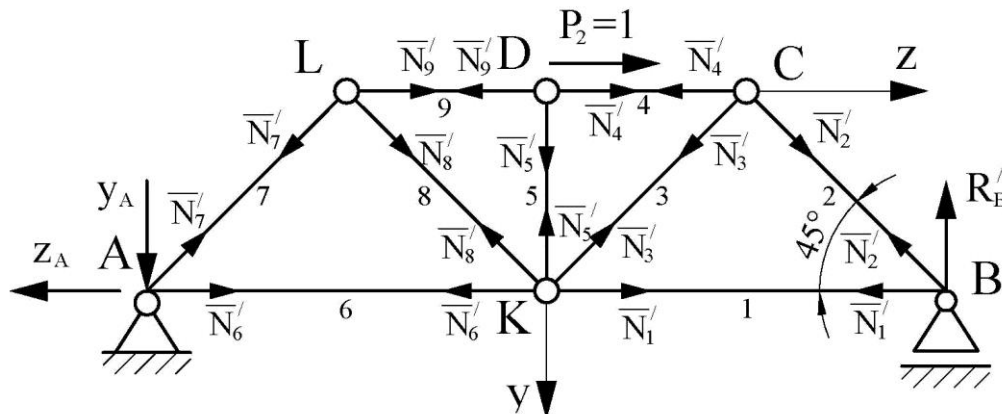


Figure 4. Scheme for determining the force in the steelwork from the action of a single force  $P_2=1$

This time it is:  $y_A=0.25$ ;  $z_A=1$ ;  $R_B' = 0.25$ ;  $\bar{N}_1' = +0.25$ ;  $\bar{N}_2' = -0.35$ ;  $\bar{N}_3' = +0.35$ ;  $\bar{N}_4' = -0.5$ ;  $\bar{N}_5' = 0$ ;  $\bar{N}_6' = +0.5$ ;  $\bar{N}_7' = +0.35$ ;  $\bar{N}_8' = -0.35$ ;  $\bar{N}_9' = +0.5$ .

7. The obtained values of internal forces are presented in Table 1 as well as the steelwork rigidity is determined.

Table 1 shows that the value of  $\delta_{12}$  is positive. This indicates that the directions of unit force  $P_2=1$  and the  $z$  axis are chosen correctly [14].

8. Analyzing the obtained data (see Table 1), we see that the largest force by the module during engine operation takes place in the rod 4, which is dangerous in terms of strength. The law of changing these forces is:

$$N_4(t) = \bar{N}_4 \cdot P_1(t) + \bar{N}_4' \cdot P_2(t) = -1 \cdot P_1(t) - 0.5 \cdot P_2(t), \quad (8)$$

where  $P_1(t)$  and  $P_2(t)$  are the laws of change of forces  $P_1$  and  $P_2$ , which are implicitly determined by the computer.

9. The data obtained (see Table 1) indicate that the rod 4, which has the largest compressive forces, and the rod 2, which compression forces are slightly smaller and the length is longer are potentially dangerous from the point of view of loss of stability.

The law of change of force in the rod 2:

$$N_2(t) = \bar{N}_2 \cdot P_1(t) + \bar{N}_2' \cdot P_2(t) = -0.71 \cdot P_1(t) - 0.35 \cdot P_2(t). \quad (9)$$

10. The cross-sectional area of the cross sections of the rods of the steelwork is determined:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{s}{d} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

$$F = \frac{3.14 \cdot 0.1^2}{4} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{0.005}{0.1} \right)^2 \right] = 1.49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Table 1

| Determination of steelwork rigidity indicators |             |              |                    |  |   |   |
|--|-------------|--------------|--------------------|--|---|---|
| Rod number                                     | $\bar{N}_i$ | $\bar{N}_i'$ | $\ell_i, \text{m}$ | $(\bar{N}_i)^2 \cdot \ell_i, \text{m}$ | $(\bar{N}_i')^2 \cdot \ell_i, \text{m}$ | $\bar{N}_i \cdot \bar{N}_i' \cdot \ell_i, \text{m}$ |
| 1  | +0.5        | +0.25        | 2                  | 0.5                                    | 0.125                                   | 0.25  |

|   |       |       |      |                                  |                                  |  |
|---|-------|-------|------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| 2 | -0.71 | -0.35 | 1.41 | 0.711                            | 0.173                            | 0.35                                       |
| 3 | +0.71 | +0.35 | 1.41 | 0.711                            | 0.173                            | 0.35                                       |
| 4 | -1    | -0.5  | 1    | 1                                | 0.25                             | 0.5  |
| 5 | -1    | 0     | 1    | 1                                | 0                                | 0  |
| 6 | +0.5  | +0.75 | 2    | 0.5                              | 1.25                             | 0.75                                       |
| 7 | -0.71 | +0.35 | 1.41 | 0.711                            | 0.173                            | -0.35                                      |
| 8 | +0.71 | -0.35 | 1.41 | 0.711                            | 0.173                            | -0.35                                      |
| 9 | -1    | +0.5  | 1    | 1                                | 0.25                             | -0.5                                       |
|   |       |       |      | $\Sigma = 6.844$                 | $\Sigma = 2.442$                 | $\Sigma = 1$                               |
|   |       |       |      | $\delta_{11} = \frac{6.844}{EF}$ | $\delta_{22} = \frac{2.442}{EF}$ | $\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{EF}$ |

11. The expressions for steelwork rigidity indices are introduced into the calculation program [14] (see Table 1), as well as the law of change of forces (6) and the value of  $F$ , so we obtain for the rod 4:

$$\sigma_{min} = -2.24 \cdot 10^7 \text{ Pa} = -22.4 \text{ MPa}, \omega_1 = 145.27 \text{ s}^{-1}, \omega_2 = 258.751 \text{ s}^{-1} \text{ (Fig. 5).}$$

Similarly for the rod 2:

$$\sigma_{min} = -1.589 \cdot 10^7 \text{ Pa} = -15.89 \text{ MPa}, \omega_1 = 145.27 \text{ s}^{-1}, \omega_2 = 258.751 \text{ s}^{-1}.$$

12. The rod 4 is verified for compliance with the strength condition:

$$|\sigma_{min}| \leq [\sigma]. \quad (11)$$

In our case  $|\sigma_{min}| = 22.4 \text{ MPa} < [\sigma]$ , so the strength of the rod 4 and of the steelwork as a whole is ensured.

13. The flexibility of the compressed rods is defined:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot \ell}{i_{min}}, \quad (12)$$

where  $\mu$  is the cast ratio of the rod;

$\ell$  is the length of the rod;

$i_{min}$  is the minimum radius of inertia of the cross-section of the rod.

Since the ends of the rods in steelwork are hinged,  $\mu = 1$  [1, p.504]. The cross section of the rods is circular, therefore:

$$i_{min} = i_x = i_y = i_{ax}; \quad i_{ax} = \sqrt{\frac{J_{ax}}{F}}; \quad J_{ax} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{s}{d} \right)^4 \right]. \quad (13)$$

With this in mind:

$$J_{ax} = \frac{3.14 \cdot 0.1^4}{64} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{0.005}{0.1} \right)^4 \right] = 1.687 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4;$$

$$i_{ax} = \sqrt{\frac{1.687 \cdot 10^{-6}}{1.49 \cdot 10^{-3}}} = 0.034 \text{ m}.$$

So for the rods 4 and 2, respectively, there is:

$$\lambda = \frac{1 \cdot 1}{0.034} = 29.4;$$

$$\lambda = \frac{1 \cdot 1.41}{0.034} = 41.5.$$

$$\begin{aligned}
 g &:= 9.81 & m &:= 2000 & H &:= 0.3 \cdot m \cdot g & \omega &:= 31.4 & E &:= 2 \cdot 10^{11} \\
 d &:= 100 \cdot 10^{-3} & F &:= 0.149 \cdot d^2 & F &= 1.49 \times 10^{-3} \\
 \delta_{11} &:= \frac{6.844}{E \cdot F} & \delta_{22} &:= \frac{2.442}{E \cdot F} & \delta_{12} &:= \frac{1.0}{E \cdot F} & \delta_{21} &:= \delta_{12} \\
 \delta_{11} &= 2.297 \times 10^{-8} & \delta_{22} &= 8.195 \times 10^{-9} & \delta_{21} &= 3.356 \times 10^{-9} & \delta_{12} &= 3.356 \times 10^{-9} \\
 a &:= \frac{\delta_{22}}{(\delta_{12} \cdot \delta_{21} - \delta_{11} \cdot \delta_{22}) \cdot m} & b &:= \frac{\delta_{12}}{(\delta_{12} \cdot \delta_{21} - \delta_{11} \cdot \delta_{22}) \cdot m} & d &:= g \left[ 1 + \frac{\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12} \cdot \delta_{21}}{(\delta_{12} \cdot \delta_{21} - \delta_{11} \cdot \delta_{22})} \right] \\
 k &:= \frac{\delta_{21}}{(\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12} \cdot \delta_{21}) \cdot m} & n &:= \frac{\delta_{11}}{(\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12} \cdot \delta_{21}) \cdot m} \\
 \text{Given} \\
 y''(t) - a \cdot y(t) + b \cdot z(t) &= \frac{H}{m} \cdot \cos(\omega \cdot t) + d & z''(t) - k \cdot y(t) + n \cdot z(t) &= \frac{H}{m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \\
 y(0) = 0 & y'(0) = 0 & z(0) = 0 & z'(0) = 0 \\
 \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} &:= \text{Odesolve} \left[ \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}, t, 4 \right] & t &:= 0, 0.002 \dots 4 \\
 P1(t) &:= m \cdot g + \frac{z(t)}{\delta_{21}} - \frac{y(t) \cdot \delta_{21} - z(t) \cdot \delta_{11}}{\delta_{21}^2 - \delta_{22} \cdot \delta_{11}} \cdot \frac{\delta_{22}}{\delta_{21}} & P2(t) &:= \frac{y(t) \cdot \delta_{21} - z(t) \cdot \delta_{11}}{\delta_{21}^2 - \delta_{22} \cdot \delta_{11}} \\
 N(t) &:= -P1(t) \cdot 1 - P2(t) \cdot 0.5 \\
 \text{ORIGIN} &:= 1 & i &:= 1 \dots 4000 & t_i &:= 0 + \frac{i}{1000} & Y_i &:= y(t_i) & Z_i &:= z(t_i) \\
 PP1_i &:= P1(t_i) & PP2_i &:= P2(t_i) & NN_i &:= N(t_i) \\
 N_{\max} &:= \max(NN) & N_{\max} &= -5.901 \times 10^3 & N_{\min} &:= \min(NN) & N_{\min} &= -3.338 \times 10^4 \\
 \sigma_{\min} &:= \frac{N_{\min}}{F} & \sigma_{\min} &= -2.24 \times 10^7 \\
 \omega_{R1} &:= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m \cdot (\delta_{11} + \delta_{22}) + m \cdot \sqrt{(\delta_{11} + \delta_{22})^2 - 4 \cdot (\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12}^2)}}} & \omega_{R1} &= 145.27 \\
 \omega_{R2} &:= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m \cdot (\delta_{11} + \delta_{22}) - m \cdot \sqrt{(\delta_{11} + \delta_{22})^2 - 4 \cdot (\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12}^2)}}} & \omega_{R2} &= 258.751
 \end{aligned}$$

Figure 5 - Dynamic calculation of the rod 4

14. Rods 4 and 2 are verified for stability.

The stability condition has the form [4]:

$$|\sigma_{\min}| \leq \varphi \cdot [\sigma] \tag{14}$$

where  $\varphi$  is the coefficient of reduction of the basic allowable stress, which depends on the flexibility of the rod  $\lambda$ .

In the corresponding table [1, p. 508] we find for the rod 4:  $\varphi=0.941$ , and for the rod 2:  $\varphi=0.916$ . Then the allowable stresses for the stability of the rods 4 and 2 respectively are:

$$\varphi \cdot [\sigma] = 0.941 \cdot 160 = 150.56 \text{ MPa},$$

$$\varphi \cdot [\sigma] = 0.916 \cdot 160 = 146.56 \text{ MPa}.$$

Comparing the value of  $|\sigma_{\min}|$  in the rods 4 and 2 with the permissible stability, we see that the condition of stability of these rods and the steelwork as a whole is fulfilled.

15. Resonance verification of the steelwork.

Resonance arises from the coincidence of the circulating frequency of the disturbing force and the resonant frequencies of the structure:  $\omega = \omega_1$ , or  $\omega = \omega_2$ . In our case,  $\omega = 31.4 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_1 = 145.27 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 258.751 \text{ s}^{-1}$ , so there is no resonance found.

There is a point of view [1, etc.] that in order to reliably prevent resonance, the value  $\omega$  must be at least 30% less than the value  $\omega_1$ :

$$\omega \leq 0,7\omega_1 \quad (15)$$

Let's verify this condition too.

In our case:  $0.7\omega_1 = 0.7 \cdot 145.27 = 101.689 \text{ s}^{-1}$ , which is greater than  $\omega$ . So this condition is also fulfilled. Verifying this condition with respect to  $\omega_2$  makes no sense, since  $\omega_2 > \omega_1$ .

Thus, all the conditions of the task are fulfilled.

Finally, we compare the results with those published in [14], which gives an example of a similar calculation of the same steelwork using a one-dimensional model that takes into account only vertical oscillations. In that example, the resonant frequency is up to  $46.577 \text{ s}^{-1}$ , and the highest modulus compression stresses in the rod 4 are  $20.4 \text{ MPa}$ .

As we can see, the one-dimensional model significantly reduces the results of the calculations, especially regarding the determination of the resonance frequencies.

**Example 2.** Ignoring the resistance of the medium, it is necessary to select the required cross-sectional dimensions of pipes with a ratio  $s/d = 0.2$  for the steelwork shown in figure 2. Pipe material is steel *St.3*,  $[\sigma] = 160 \text{ MPa}$ . Weight of statically unbalanced electric motor installed on the steelwork  $m = 1400 \text{ kg}$ , its circular speed  $\omega = 104.667 \text{ c}^{-1}$  (1000 rpm), the module created by it disturbing force  $H = 0.3mg$ . Determine the resonant frequencies of the design.

#### Solution

1. – 9. Paragraphs 1 to 9 are the same as in Example 1.

10. From formulas (8), (10), (11) and the conditions of example 2, the values of  $F$ ,  $J_{ax}$ ,  $i_{ax}$ , and  $\lambda$  are expressed through the outer diameter of the pipe  $d$ :

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{s}{d} \right)^2 \right] = \frac{3.14 \cdot d^2}{4} \cdot \left[ 1 - (1 - 2 \cdot 0.2)^2 \right] = 0.502 \cdot d^2; \quad (16)$$

$$J_{ax} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - 2 \cdot \frac{s}{d} \right)^4 \right] = \frac{3.14 \cdot d^4}{64} \cdot \left[ 1 - (1 - 2 \cdot 0.2)^4 \right] = 0.043 \cdot d^4; \quad (17)$$

$$i_{ax} = \sqrt{\frac{0.043 \cdot d^4}{0.502 \cdot d^2}} = 0.292 \cdot d; \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{\mu \cdot \ell}{i_{ax}} = \frac{1 \cdot \ell}{0.292 \cdot d} = 3.425 \cdot \frac{\ell}{d}. \quad (19)$$

11. From the condition of strength at static loading of the steelwork by the weight of idle engine, the desired value of  $d$  is determined:

$$F = 0.502 \cdot d^2 \geq \frac{|\bar{N}|_{\max} \cdot mg}{[\sigma]} = \frac{1 \cdot 1400 \cdot 9.81}{160} = 85.8 \text{ mm}^2;$$

$$d \geq \sqrt{\frac{85.8}{0.502}} = 13.1 \text{ mm}.$$

From the normal series of linear dimensions (*Ra 20*, GOST 6636 – 69) [15] we accept:  $d = 14 \text{ mm}$ . From this a dynamic calculation starts, which consists of successive strength and stability verifications of the rods 4 and 2 at values  $d \geq 14 \text{ mm}$  according to the method described in example 1, taking into account expressions (16) – (19). The results of the dynamic calculation are presented in Tables 2 and 3.

As can be seen from Tables 2 and 3, strength and durability of both rods, as well as of the steelwork as a whole, is provided by pipe  $40 \times 8 \text{ mm}$ . In this case, the resonance frequencies are:  $\omega_1 = 127.481 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 227.065 \text{ s}^{-1}$ , which is quite far from the resonance. The values  $d = 32 \text{ mm}$  and  $d = 18 \text{ mm}$  are the closest to it, at which the stresses in both rods are the greatest.

Table 2

Results of dynamic calculation of the rod 4

| $d, mm$ | $F, mm^2$ | $N(t) = -P_1(t) \cdot l - P_2(t) \cdot 0.5$ |                       |           |           |                               | $\omega_1, s^{-1}$ | $\omega_2, s^{-1}$ |
|---------|-----------|---|-----------------------|-----------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
|         |           | $ N_{min} , N$                              | $ \sigma_{min} , MPa$ | $\lambda$ | $\varphi$ | $\varphi \cdot [\sigma], MPa$ |                    |                    |
| 14      | 98.4      | 18660                                       | 189.7                 | 245       | < 0.19    | <30.4                         | 44.618             | 79.473             |
| 16      | 128.5     | 22950                                       | 178.6                 | 214       | < 0.19    | <30.4                         | 50.992             | 90.826             |
| 18      | 162.6     | 61880                                       | 380.5                 | 190       | 0.210     | 33.6                          | 57.366             | 102.179            |
| 20      | 200.8     | 30790                                       | 153.3                 | 171       | 0.257     | 41.1                          | 63.740             | 113.533            |
| 22      | 243.0     | 25690                                       | 105.7                 | 156       | 0.302     | 48.3                          | 70.114             | 124.886            |
| 25      | 313.8     | 27750                                       | 88.4                  | 137       | 0.372     | 59.5                          | 79.675             | 141.916            |
| 28      | 393.6     | 38760                                       | 98.5                  | 122       | 0.440     | 70.4                          | 89.237             | 158.946            |
| 32      | 514.0     | 181600                                      | 353.3                 | 107       | 0.544     | 87.0                          | 101.985            | 181.652            |
| 36      | 650.6     | 67570                                       | 103.9                 | 95        | 0.645     | 103.2                         | 114.733            | 204.359            |
| 40      | 803.2     | 41400                                       | <b>51.5</b>           | 86        | 0.714     | <b>114.2</b>                  | 127.481            | 227.065            |

Table 3

Results of dynamic calculation of the rod 2

| $d, mm$ | $F, mm^2$ | $N(t) = -P_1(t) \cdot 0.71 - P_2(t) \cdot 0.35$ |                       |           |           |                               | $\omega_1, s^{-1}$ | $\omega_2, s^{-1}$ |
|---------|-----------|---|-----------------------|-----------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
|         |           | $ N_{min} , N$                                  | $ \sigma_{min} , MPa$ | $\lambda$ | $\varphi$ | $\varphi \cdot [\sigma], MPa$ |                    |                    |
| 14      | 98.4      | 13190   | 134.1                 | 345       | < 0.19    | <30.4                         | 44.618             | 79.473             |
| 16      | 128.5     | 16170   | 125.8                 | 302       | < 0.19    | <30.4                         | 50.992             | 90.826             |
| 18      | 162.6     | 43110   | 265.1                 | 268       | < 0.19    | <30.4                         | 57.366             | 102.179            |
| 20      | 200.8     | 21620   | 107.7                 | 241       | < 0.19    | <30.4                         | 63.740             | 113.533            |
| 22      | 243.0     | 18140   | 74.7                  | 220       | < 0.19    | <30.4                         | 70.114             | 124.886            |
| 25      | 313.8     | 19660   | 62.7                  | 193       | 0.204     | 32.6                          | 79.675             | 141.916            |
| 28      | 393.6     | 27470   | 69.8                  | 172       | 0.254     | 40.6                          | 89.237             | 158.946            |
| 32      | 514.0     | 128800  | 250.6                 | 151       | 0.317     | 50.7                          | 101.985            | 181.652            |
| 36      | 650.6     | 47910   | 73.6                  | 134       | 0.384     | 61.4                          | 114.733            | 204.359            |
| 40      | 803.2     | 29360   | <b>36.6</b>           | 121       | 0.445     | <b>71.2</b>                   | 127.481            | 227.065            |

**Conclusions.** An advanced technique of power calculations of flat steelworks is developed, based on previously created and implemented in Mathcad system of a simplified two-dimensional model of forced oscillations, which significantly improves the accuracy and reliability of determination of dynamic forces, stresses and resonance frequencies in comparison with the common in practice model that takes into account only vertical fluctuations, ignoring horizontal ones.

The developed technique allows to determine the maximum dynamic forces and stresses in an oscillating steelwork, to calculate its resonant frequencies, to verify the fulfillment of the conditions of strength and stability, to select the required cross-sectional dimensions of the rods in order to guarantee these conditions.

The methodology is illustrated by the examples of test and design calculations and can be recommended to students and manufacturing professionals for use in educational and engineering practice.

In the future, it is appropriate to create a cross-platform computer program that would cover all stages of the calculation by the developed method, and thus simplify and accelerate it as much as possible.

**References**

1. Дарков А. В. Сопротивление материалов: Учеб. для техн. вузов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М.: Высш. шк., 1989. – 624 с.
2. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности / В.А. Икрин. – М.: Изд. АСВ, 2004. – 424 с.

3. Грес П.В. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов: Учеб. пособие для ВУЗов / П.В. Грес. – М.: Высш. шк., 2004. – 135 с.
4. Писаренко Г. С. Опір матеріалів: Підр. для техн. ВНЗ / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
5. Шевченко Ф. Л. Курс опору матеріалів. Порада до вивчення теорії та розв'язання задач: Навч. посібник / Ф. Л. Шевченко. – Донецьк: ДонНТУ, 2013.– 260 с.
6. Purushothama Rai. P. Strength of Materials / P.Rai. Purushothama, V.Ramasamy.– Pearson India, 2012. – 1039 p.
7. Поляков А. А. Строительная механика: Учеб. пособие / А. А. Поляков, Ф. Г. Лялина, Р. Г. Игнатов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 424 с.
8. Olsson K.- G. Structural Mechanics: Modelling and Analysis of Frames and Steelworkes / K.- G. Olsson, O. Dahlblom. – John Wiley & Sons, 2016. – 344 p.
9. Lacarbonara W. Nonlinear Structural Mechanics: Theory, Dynamical / W. Lacarbonara. – Springer Science & Business Media, 2013. – 802 p.
10. Carpinteri A. Structural Mechanics Fundamentals / A.Carpinteri. – CRC Press, 2013.– 512p.
11. Carpinter A. Advanced Structural Mechanics / A. Carpinter . – CRC Press, 2017. – 531 p.
12. Ламси Б. Б. Сборник задач и упражнений по динамике стержневых систем: Учеб. пособие / Б. Б. Ламси и др. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2016. – 96 с.
13. Уфимцев Е.М. Моделирование нелинейных колебаний плоских ферм при нестационарных процессах на основе метода временного анализа / Е.М. Уфимцев. – Челябинск: Вестник ЮУрГУ, серия “Строительство и архитектура”, 2017, № 1, С. 20 – 33.
14. Холодняк Ю. С. Упрощенная методика силового расчёта плоских рам в условиях вынужденных колебаний / Ю. С. Холодняк, С. В. Подлесный, С. В. Капорович. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – № 1(43). – С.198 –213.
15. Kholodnyak Yu.S. Elaboration of a Methodology of Pover Calculations of Flat Frames Under Conditions of Forced Oscillations / Yu.S. Kholodnyak, S.V. Kaporovych, Ye.D. Korotenko // Contemporary Innovation Technique of Engineering Personnel Training for the Mining and Transport Industry 2019 (CITERMTI'2019). Conference Proceedings (2019). – Ukraine, Dnipro: NTUDP.– P. 92–100.
16. Кутовой Л. В. Збірник розрахунково – графічних завдань з курсу "Опір матеріалів" (для студентів всіх механічних спеціальностей денної форми навчання) / Л. В. Кутовой та ін. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – 220 с.

**Холодняк Ю.С., Подлесный С.В., Капорович С.В., Коротенко Є.Д.**

Донбаська державна машинобудівна академія

#### **ПРО ЗАСТОСУВАННЯ СПРОЩЕНОЇ ДВОВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ДО СИЛОВОГО АНАЛІЗУ ПЛОСКИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

*Виконано аналіз існуючих методів силового розрахунку ферм, які перебувають під дією вимушених коливань. При розгляданні вимушених коливань плоских ферм застосовуються двовимірні моделі, які є складними для широкого практичного використання. Їх реалізація потребує поглибленої математичної підготовки і складних обчислювальних засобів. Метою даної роботи є розробка спрощеної двовірної математичної моделі вимушених коливань плоских ферм з наступним використанням цієї моделі в їх силових розрахунках. Математична модель, що запропонована в роботі, описує коливання невагомої ферми з точковою масою при одночасній дії на них вертикальної й горизонтальної гармонійних збуджуючих сил. У основу моделі покладений метод сил, що встановлює зв'язок переміщень ферми з силами, які на неї діють. Разом з моделлю отримані залежності для обчислення резонансних частот коливальної системи. Виконані розробки дозволяють визначати динамічні характеристики коливального процесу і розраховувати ферми на міцність, жорсткість та стійкість.*

***Ключові слова:** плоскі ферми, вимушені коливання, математична модель, резонансні частоти, силові розрахунки.*

**Холодняк Ю.С., Подлесный С.В., Капорович С.В., Коротенко Е.Д.**

Донбасская государственная машиностроительная академия

#### **О ПРИМЕНЕНИИ УПРОЩЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ К СИЛОВОМУ АНАЛИЗУ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

© Yu.S. Kholodnyak, S.V. Podlesny, S.V. Kaporovych, Ye.D. Korotenko

*Выполнен анализ существующих методов силового расчета ферм, находящихся под действием вынужденных колебаний. При рассмотрении вынужденных колебаний плоских ферм применяются двумерные модели, которые являются сложными для широкого практического использования. Целью данной работы является разработка упрощенной двухмерной математической модели вынужденных колебаний плоских ферм с последующим использованием этой модели в их силовых расчетах. Математическая модель, предложенная в работе, описывает колебания невесомого фермы с точечной массой при одновременном действии на них вертикальной и горизонтальной гармонических возмущающих сил. В основу модели положен метод сил, устанавливающий связь перемещений фермы с силами, которые на нее действуют. Вместе с моделью получены зависимости для вычисления резонансных частот колебательной системы. Выполненные разработки позволяют определить динамические характеристики колебательного процесса и рассчитывать фермы на прочность, жесткость и устойчивость.*

**Ключевые слова:** *плоские фермы, вынужденные колебания, математическая модель, резонансные частоты, силовые расчеты.*

УДК 004.896

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-17>

I.Yakovenko, V.Martynenko, M.Turchyna

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

### BIOMETRICAL IDENTIFICATION ON THE BASIS OF PHOTOPLETHYSMOGRAM FOR AUTOMATED MEDICAL SYSTEMS

Nowadays, modern digital integration requires all personal databases to have reliable protection. It concerns automated diagnosis and lab research of biological materials systems the most. Each step of the way creates a high risk of losing or replacement of information, which leads to incorrect diagnosis, or even falsification for further illegal use. Biometrical identification is able to solve many protection issues, since the important information is always tied to a person, and is not usable by different people with malicious intent, be it stealing or replacement. Biometry is a way to identify and authenticate a person by measuring their physiological parameters, which makes biometrical control one of the better ways for identification. This research is a look into different ways to identify a person by means of biological signals using plethysmography. This research was conducted using a biometrical measurement system KL-720 using a photo sensor, which easily registers on different parts of a human body a finger, an ear, a hand or an arm. It's ease of use, low price and small size makes it the prime choice.

**Key words:** biometrical identification, photoplethysmography, PPG, biometrical signal, discriminant analysis, pulse wave, automated system.

In a modern world, biometrical data is divided in two generations. First generation is used when describing fingerprints, signatures and voices. This generation can easily be copied, which creates a possibility for crimes to be committed. Second generation uses anatomical activity of any human organ using biological signals. Such activity is accompanied by certain cyclic changes, for example, blood vessels change during blood flow. Those changes are explained by physiological features of the organism. Researching anatomical activity creates a way to gather a unique biometrical signal and solve the problem of a reliable way of identifying a person.

Photoplethysmogram is an optical method of registering the volumetric blood pulse, which is caused by periodical changes in blood volume because of the heartbeat, by the means of infrared or visible light exposition to live tissue [3]. Just like every other biometrical signal created by a human organism, photoplethysmogram holds unique information about a certain person (blood vessel tension, peripheral hemodynamics condition, saturation, heart cycle frequency). Quantitative and qualitative analysis of photoplethysmogram is conducted using a plethora of normative parameters of the pulse wave, which are used for identification. Points B1, B2, B3, B4 and B5 of a filtered signal, that are depicted on figure 1, are called main coding points of a volumetric pulse. They are used to identify the parameters of the pulse wave [4].

To measure a photoplethysmogram (PPG), a biomedical measurement system with a sensitive photo sensor, KL-720, was used (figure 2). The detector is a combination of an infrared diode and a receiving phototransistor, which works in a common collector mode.

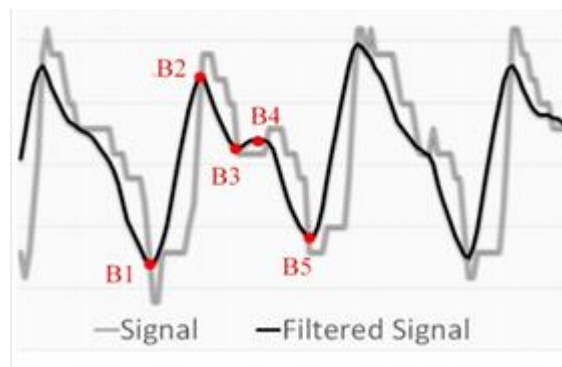


Figure 1. Initial and filtered signals: B1 –the beginning of the systolic period, B2 – the maximal expansion of the vessel, B3 – the protodiastolic process, B4 – the diastole, B5 – the end of the cardiac cycle.



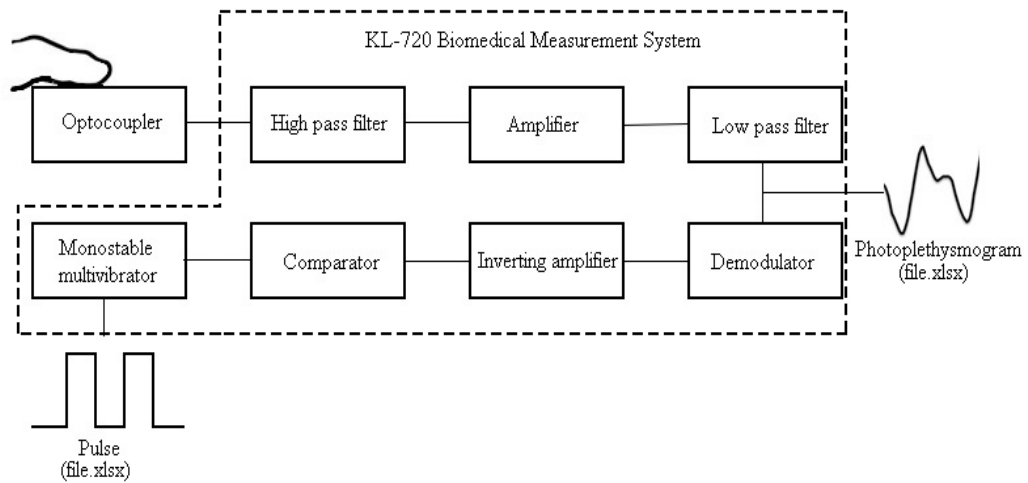


Figure 2. Overall structural scheme of the KL-720 measurement channel

When a research object touches the detector, the intensity of the reflected infrared light changes based on the level of saturation of the blood vessel part in question. The extracted signal holds a very unclear information, which makes the further biomedical diagnosis impossible. That's a good enough reason to use a high-frequency Butterworth filter. This filter removes the noise created by the trembling of the patient's finger and the shift in power of the direct current in the machine. The next step of processing the data lies in amplifying the signal based on OP3A with a coefficient of 50, 100, with the point being the amplification of the signal for further filtration with a 4-diapason low-frequency filter. Low frequency filter is made by consequential connection of two diapason Butterworth filters, which lowers the noise produced by the power source of KL-720 and the residual lighting of the fluorescent lamps that may be the source of light in the laboratory. On this stage the data resembles the PPG signal, and is written to a .xlsx file on a personal computer via the COM-port. Further modules are used for changing the signal to pinpoint the heart pulse signal in the form of rectangular impulses of a monostable multivibrator [5,6].

The research of identification a person by means of a biological PPG signal was conducted using the interval parameters of the amplitude (table 1) and time (table 2).

Table 1

Pulse wave amplitude parameters

|                  | Pulse wave amplitude (PWA) | Dycrotic wave amplitude (DWA) | Notch height (NH)   | Dycrotic wave index (DWI)                 |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|---|
| Formula          | $PWA = B2 - B1$            | $DWA = B4 - B5$               | $NH = B3 - B5$      | $DWI = (B3 - B5) / (B2 - B1) \cdot 100\%$ |
| Normative values | —                          | $PWA / 2$                     | $(2 \cdot DWA) / 3$ | 63-73%                                    |

Table 2

Pulse wave time parameters

|                  | Anacrotic phase duration (APD) | Dycrotic phase duration (DPD) | Pulse wave duration (PWD) | Outgoing wave index (OWI)                 |
|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| Formula          | $APD = B3 - B1$                | $DPD = B5 - B4$               | $PWD = B5 - B1$           | $OWI = (B2 - B1) / (B5 - B1) \cdot 100\%$ |
| Normative values | —                              | —                             | —                         | 15-24%                                    |

To conduct the research, 56 measurements of thPPG were taken, all of which were centered and processed using median filtration (figure 3). The database for further discriminant analysis holds data from studies, in which 39 observations were assigned to an "identified" person, the others – to the unauthorized ones.

Discriminant analysis allows for pinpointing the differences between the two groups and creating a group classifier. Discriminant analysis is characterized by two unbound variables input methods [6-8]:

- forced inclusion, which holds all of the unbound variables that are satisfactory of certain criteria (tolerance);
- step selection, which operates by step-by-step input and removal of data.

The research of the average value and standard deviation (table 3)

of the parameters PWA, DWA and NH it's established that average values for an identified person are completely different from the average values of people that are unknown for the algorithm.

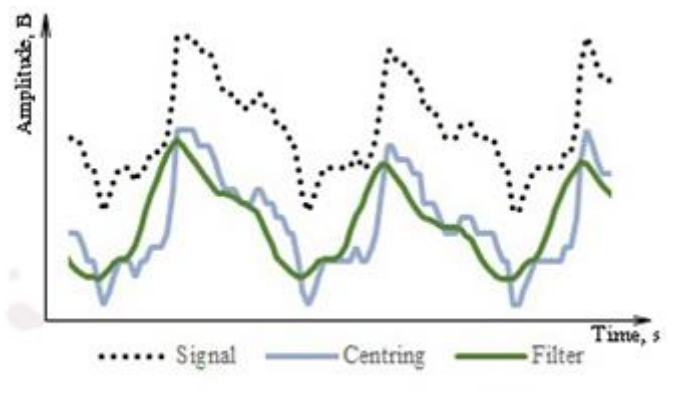


Figure 3. Processed signal

Table 3

Comparative table of the average values

| Identifications status | Parameter | Average value | Standard deviation |
|------------------------|-----------|---------------|--------------------|
| No                     | PWA       | 2,5247        | 1,17360            |
|                        | DWA       | 1,2424        | 0,70385            |
|                        | NH        | 1,5194        | 0,84254            |
| Yes                    | PWA       | 0,6459        | 0,05716            |
|                        | DWA       | 0,3210        | 0,04352            |
|                        | NH        | 0,3823        | 0,04853            |
| Total                  | PWA       | 1,2163        | 1,07832            |
|                        | DWA       | 0,6007        | 0,57284            |
|                        | NH        | 0,7275        | 0,69747            |

The result of a discriminant analysis by means of forced inclusion of all collected data for interval characteristics is present in table 4, which suggests the results of the classification. The conducted analysis demonstrates that of 17 measurements that belong to unidentified people, algorithm slipped 3 times, and assigned them to the identified cluster. Overall success rate – 94,6%.

Table 4

Results of forced inclusion classification

|                         |               | Identification status | Foreseen group alignment |       | Total |
|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|-------|-------|
|                         |               |                       | No                       | Yes   |       |
| Factual group alignment | Amount        | No                    | 14                       | 3     | 17    |
|                         |               | Yes                   | 0                        | 39    | 39    |
|                         | Percentage, % | No                    | 82,4                     | 17,6  | 100,0 |
|                         |               | Yes                   | 0,0                      | 100,0 | 100,0 |

The second method of conducting discriminant analysis that includes every observation step-by-step, slipped only 1 time. The overall percentage of success – 98,2% (table 5).

Table 5

Results of step selection

|                         |               | Identification status | Foreseen group alignment |       | Total |
|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|-------|-------|
|                         |               |                       | No                       | Yes   |       |
| Factual group alignment | Amount        | No                    | 16                       | 1     | 17    |
|                         |               | Yes                   | 0                        | 39    | 39    |
|                         | Percentage, % | No                    | 94,1                     | 5,9   | 100,0 |
|                         |               | Yes                   | 0,0                      | 100,0 | 100,0 |

**Results.** The need for a reliable, unique biometrical signal, that is identifiable by the least possible technical equipment and is easy to integrate into automated diagnosis and analysis systems is rising steadily. Technically, PPG completely meets these requirements and by the results of discriminant analysis using both methods, is on a high level. Forced inclusion method sits on a 94,6% success rate, while the step selection raised that rate up to 98,2%. Photoplethysmogram is a unique biometrical signal that needs further development of a precise algorithm of processing the signal, and a method of classification of the obtained indicators for improving the identification process.

#### Sources of information

1. Azam, Siti Nurfarah Ain Mohd et al. "Photoplethysmogram Based Biometric Identification Incorporating Different Age and Gender Group." (2018).
2. Onn, T.H., masyarakat, K., terhadap, K., kerusi, P., meningkat, R.T., bukan, D.K., kepada, S., kurang, M.O., tetapi, U., tua, J.U., bagaimanapun, W., kepada, A.T., & mempunyai, P.Y. (2015). ANALYSIS OF ELECTROMYOGRAPH (EMG) FOR CONTROLLING WHEELCHAIR MOTION WAN SAIDATULAKMA BINTI MEOR ZAINOL A project report submitted in partial fulfillment of the requirement for the award of the Master of Electrical Engineering.
3. Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. – М.; Радио и связь, 2013 – с.27-56
4. Karimian, N., Guo, Z., Tehranipoor, M., & Forte, D. (2017). Human recognition from photoplethysmography (PPG) based on non-fiducial features. 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).doi:10.1109/icassp.2017.7953035
5. Дискриминантний аналіз [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSLVMB\\_25.0.0/spss/base/idh\\_disc.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSLVMB_25.0.0/spss/base/idh_disc.html).
6. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. - Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999, с.270
7. Кларк Д.В., мл., Ньюман М. Р., Олсон В.Х. и др. Ред. Д.Г. Вебстер. Медицинские приборы. Разработка и применение. – К.: Медторг, 2004. - 620 с
8. Яненко О. П., Перегудов С. Н., Куценко В. П. Медична техніка для терапії та діагностики: навчальний посібник / НТУУ «КПІ». Київ : НТУУ «КПІ», 2013.

**Яковенко І.О., Мартиненко В.І., Турчина М.О**

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

#### **БИОМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАМИ ДЛЯ АВТОМТИЗОВАНИХ МЕДИЧНИХ СИСТЕМ**

*На сьогоднішній день з розвитком цифрової інтеграції всі особисті бази даних потребують надійного захисту. Особливо це стосується автоматизованих систем діагностики та проведення лабораторних досліджень біологічного матеріалу. Так, як на кожному етапі існує висока можливість втрати чи підміни інформації, що приведе до некоректного встановлення діагнозу, чи навіть фальсифікації для подальшого незаконного використання. Біометрична ідентифікація здатна вирішити багато питань безпеки, так як необхідна інформація завжди знаходиться з особистістю, і не може бути використана сторонньою особою (вкрадена чи підмінена). Біометрія - це автентифікація та ідентифікація людини шляхом вимірювання або оцінки її фізіологічних параметрів. Тому, біометричний контроль вважається більш надійним та має кращий потенціал у заміні традиційних методів ідентифікації людини. Таким чином, у цьому дослідженні буде розглянуто можливість ідентифікації особистості за рахунок біосигналу людині з використанням методу фотоплетизмографії. Дослідження проводилось на біомедичній системі вимірювання KL-720 з використанням відповідного фотосенсору, що легко фіксується у різних частинах людського тіла (палець, вушна доля, зап'ястя, рука), простий у використанні, та має низьку вартість та невеликі розміри.*

**Ключові слова:** біометрична ідентифікація, фотоплетизмографія, ФПГ, біометричний сигнал, дискримінантний аналіз, пульсова хвиля, автоматизована система.

**Яковенко И.А., Мартиненко В.И. Турчина М.О**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского

## **БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАМЫ ДЛЯ АВТОМТИЗОВАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ**

*На сегодняшний день с развитием цифровой интеграции все личные базы данных нуждаются в надежной защите. Особенно это касается автоматизированных систем диагностики и проведения лабораторных исследований биологического материала. Так как на каждом этапе существует высокая вероятность потери или подмены информации, что приведет к некорректной постановке диагноза или даже фальсификации для дальнейшего незаконного использования. Биометрическая идентификация способна решить многие вопросы безопасности, так как необходимая информация всегда находится с личностью, и не может быть использована посторонним лицом (украдена или подменена). Биометрия — это аутентификация и идентификация человека путем измерения или оценки ее физиологических параметров. Поэтому, биометрический контроль считается более надежным и имеет лучший потенциал в замене традиционных методов идентификации человека. Таким образом, в этом исследовании будет рассмотрена возможность идентификации личности за счет биосигналов человеку с использованием метода фотоплетизмографии. Исследование проводилось на биомедицинской системе измерения KL-720 с использованием соответствующего фотосенсора, который легко фиксируется в разных частях человеческого тела (палец, ухо, запястье, рука), простой в использовании и имеет низкую стоимость и небольшие размеры.*

**Ключевые слова:** биометрическая идентификация, фотоплетизмография, ФПГ, биометрический сигнал, дискриминантный анализ, пульсовая волна, автоматизированная система.

УДК 004.896

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-18>

I.Yakovenko, A.Rudoy, M.Turchyna

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

### IMPROVEMENT OF THE CREDIBILITY OF ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAMS FOR BIOMETRIC PERSONAL IDENTIFICATION

Nowadays there is a high demand for biometric authentication. These systems possess a high level of protection, as they evaluate not only the physical parameters, but also personality characteristics. The paper analyzes a biometric scheme based on the electrical activity of the human heart in the form of electrocardiogram (ECG) signals. The study was performed using standard laboratory measurements KL-720 has all age groups. As a result, an electrical activity signal was obtained. The aim of this work was to filter the captured signal for further use with biometric data.

**Key Words:** electrocardiogram, biometric identification, authentication, ECG parameters, high-frequency noise, low-frequency noise, Z-scaling, HPF Butterworth.

Currently identity authentication is carried out using biometric methods, as biometric access control systems are convenient for users in that the necessary information is always with them and cannot be lost, stolen, or falsified. Such access control is more reliable since identifiers cannot be transferred to third parties or copied to bypass the security system [1].

Existing methods of personal identification (Fig. 1) are divided into static, which are constant in time, and dynamic, in which, according to biometric properties, the measurement process takes some time which is necessary to find personal characteristics. Despite the advantage of the presented methods, there is still a risk of obtaining information by third parties. As the identification by face is easy to get around by the photograph, there is a similar method which uses the iris of the eye, though it is quite inconvenient [1,2]. The fingerprint identification method is used by most people on smartphones daily, however it is not safe enough to protect important and confidential information by this method, since it is easy to make a mold and make a fingerprint model which allows to bypass the system easily.

The prevention of fatal errors associated with personal identification in medical institutions is extremely important, as it is important to determine the identity of the patient before any medical manipulation. For such purposes the physical access control system (PACS) is used to identify an individual and automatically provide access to information. Unfortunately, there is no legislative document on the implementation of the identification process. This means that it is very important to develop a local patient identification algorithm. To choose a method with a lower cost of expenses but with sufficient accuracy in determining the identity, it is necessary to compare each of the possible ones. Table 1 shows a comparison of the methods for the main parameters [1-3].

FAR (False Acceptance Rate) - false pass coefficient, i.e. the percentage of cases, in which the system allows access to a user who is not registered in the system.

FRR (False Rejection Rate) - false failure rate, i.e. denial of access to the real user of the system.

The falsification of biometric data for obtaining information and control is a complex process, which is possible with special preparation and special technical support. Based on this, it was proposed to use a signal of electrical activity of the heart. Since the electrical activity of each person is

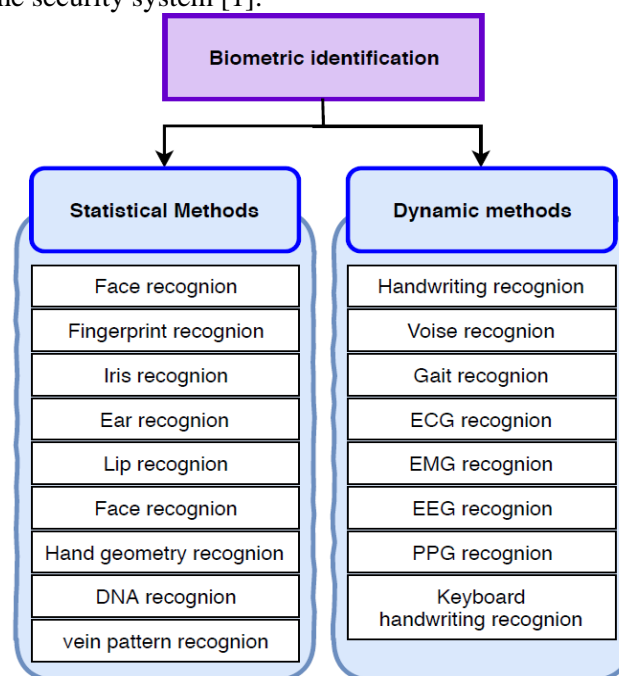


Fig.1. Classification of biometric personality identification.

unique, it is possible to use an ECG as a biometric parameter in various identification systems with a high degree of protection.

Table 1

Comparison of biometric identification methods

| Biometric PACS uses | FAR %   | FRR % | Falsification | Invariance of characteristic | Sensitivity to external factors | Speed of authentication | Price   |
|---------------------|---------|-------|---------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------|
| Fingerprint         | 0,001   | 0,6   | Possible      | Low                          | High                            | High                    | Low     |
| Face Recognition 2D | 0,1     | 2,5   | Possible      | Low                          | High                            | Average                 | Average |
| Face Recognition 3D | 0,0005  | 0,1   | Problematic   | High                         | Low                             | Low                     | High    |
| Iris                | 0,00001 | 0,016 | Unsuccessful  | High                         | Average                         | High                    | High    |
| Retina              | 0,0001  | 0,4   | Impossible    | Average                      | High                            | Low                     | High    |
| Vein Pattern        | 0,0008  | 0,01  | Impossible    | Average                      | Average                         | High                    | Average |
| Recognition by ECG  | 0,0005  | 0,01  | Problematic   | Average                      | Average                         | High                    | Average |

The identification process can be divided into the following stages:

- collection of source data;
- signal preprocessing (filtering, etc.);
- extraction of characteristic features, their processing and template creation;
- comparison of the incoming template with a database of generated templates.

The most difficult problem in identification is the allocation of features that characterize the object. Several approaches based on the selection of parameters such as amplitudes, angles, vertical and horizontal components of the segments of the ECG signal are proposed [3,4].

To obtain an ECG, a training stand for the study of biomedical measurements KL-72001 was used. It is possible to connect 9 modules to this stand, one of which is an electrocardiogram module called KL-75001. This module serves to study the phenomenon of the occurrence of electrical potentials during heart contractions. The module uses 6 limb leads to record an electrocardiogram. Figure 2 shows a block diagram of an ECG measuring circuit with electrode clips, which are used to record very weak and time-varying potentials. Circuit limb choice contains a voltage follower circuit which matches the impedance between the electrode and the skin enhancing the measurement sensitivity. An isolation circuit is provided for the signal isolation and the power supply line using an optical method. The passband of the bandpass filter equals 0.1 - 100Hz and the gain of the amplifier is 10. Upon the signal passage through the notch filter with an average frequency of 50Hz, it is displayed on the oscilloscope screen.

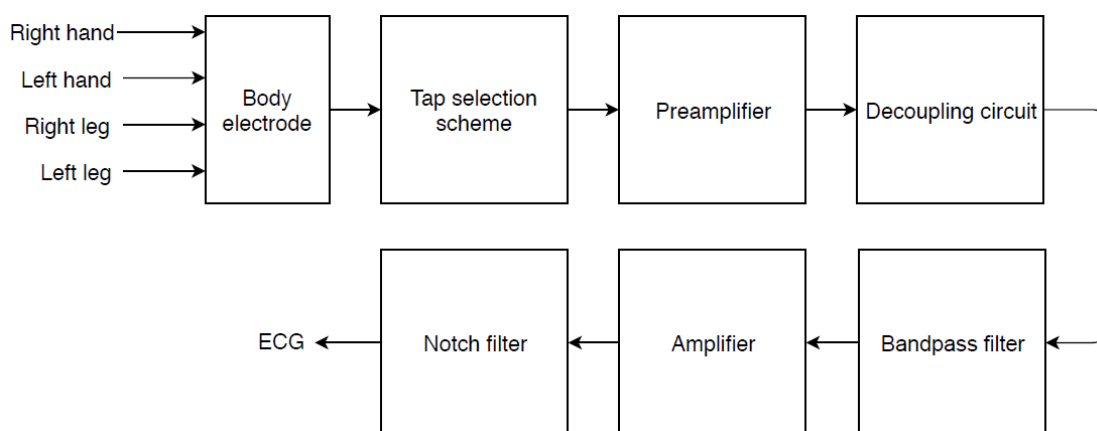


Fig.2. Block diagram of the ECG measuring circuit

The study used the first lead, by which it is clearly possible to identify the necessary protrusions and periods of electrical activity of the heart. To conduct an ECG analysis, the signal was recorded at the same time of the day under the same conditions in males aged 20-25.

A database (table 2) containing the values of the received voltage in each experiment was created. As a result of measuring bioelectric processes in the myocardium using an electrocardiograph and recording the signal in a digital form, the experiment was subject to a number of problems, such as low-frequency drift, noise, etc. [5, 6]. For analysis, the site with the minimal influence of interference is selected, the studied areas are chosen and the signal is filtered.

Table 2

Values of the received pulse waves

|               | Experiment No. |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Amplitude, mV | -0,96          | -0,64 | -2,64 | -2,08 | -2,16 | -2,88 | -1,04 | -0,8  | -1,6  | -2,08 |
|               | -0,72          | -0,48 | -2,48 | -1,6  | -2,16 | -2,48 | -0,96 | -0,56 | -1,36 | -1,6  |
|               | -0,72          | -0,24 | -2,32 | -1,36 | -1,68 | -1,92 | -1,44 | -0,24 | -1,2  | -1,36 |
|               | -0,4           | -0,24 | -1,92 | -1,04 | -1,44 | -1,44 | -2,08 | -0,16 | -0,8  | -1,04 |
|               | -0,4           | -0,16 | -1,68 | -0,88 | -1,2  | -1,12 | -2,24 | -0,16 | -0,64 | -0,88 |
|               | -0,32          | -0,16 | -1,36 | -0,64 | -1,04 | -0,88 | -2,16 | -0,24 | -0,48 | -0,64 |
|               | -0,24          | -0,24 | -1,12 | -0,48 | -0,8  | -0,48 | -1,92 | -0,4  | -0,4  | -0,48 |
|               | -0,4           | -0,08 | -1,04 | -0,32 | -0,88 | -0,32 | -1,76 | -0,16 | -0,32 | -0,32 |
|               | -0,16          | -0,24 | -0,88 | -0,16 | -0,96 | -0,16 | -1,52 | -0,4  | -0,08 | -0,16 |
|               | -0,08          | -0,16 | -0,8  | 0     | -1,04 | 0,08  | -1,2  | -0,4  | 0     | 0     |
|               | 0,48           | -0,16 | -0,72 | 0,16  | -0,96 | 0,4   | -0,8  | -0,72 | 0,08  | 0,16  |
|               | 0,16           | -0,16 | -0,56 | 0,16  | -0,96 | 0,56  | -0,24 | -0,64 | 0,08  | 0,16  |
|               | 0,56           | -0,08 | -0,4  | 0,32  | -0,72 | 0,72  | 0,08  | -0,88 | 0,16  | 0,32  |
|               | 0,56           | -0,16 | -0,24 | 0,24  | -0,8  | 0,8   | -0,16 | -0,56 | -0,08 | 0,24  |
|               | 0,56           | -0,24 | -0,08 | 0,4   | -0,56 | 0,88  | -0,08 | -0,16 | -0,08 | 0,4   |
|               | 0,56           | -0,16 | 0     | 0,4   | -0,48 | 0,88  | 0     | -0,72 | -0,08 | 0,4   |
|               | 0,72           | -0,16 | 0,16  | 0,48  | -0,32 | 0,8   | -0,4  | -1,04 | 0     | 0,48  |
|               | 1,04           | 0     | 0,32  | 0,8   | -0,16 | 0,8   | 3,52  | -1,6  | 0,32  | 0,8   |
|               | 0,4            | 0     | 0,32  | 0,88  | 0     | 0,56  | 5,76  | -1,68 | 0     | 0,88  |
|               | 0,08           | 0,08  | 0,96  | 0,48  | 0,08  | 0,48  | -1,2  | -1,92 | -0,64 | 0,48  |

When constructing the selected areas Fig.3 was obtained, which shows ECG measurements over ten days of the study.

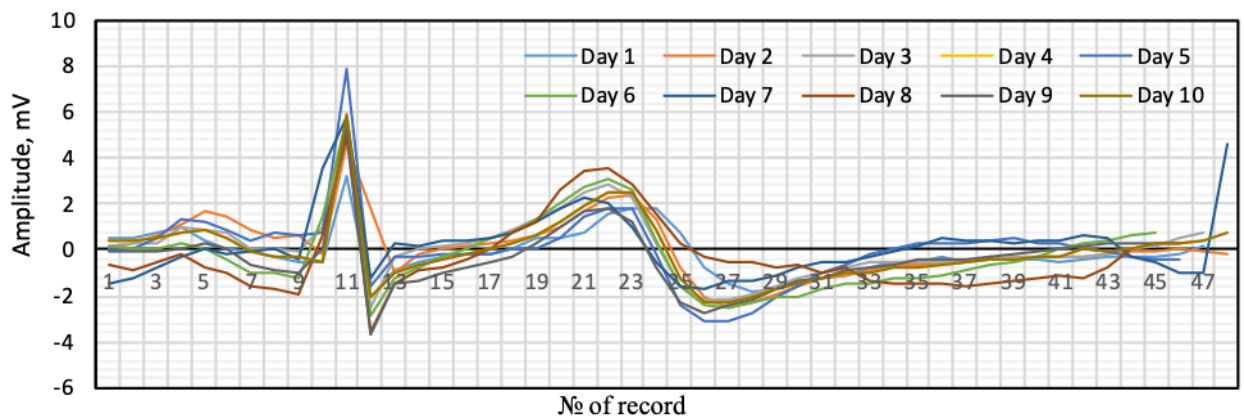


Fig.3. Graph of reference ECG curves for each experiment

Having selected the studied ECG sections, it is necessary to bring it to a form acceptable for analysis by digital filtering of the signal. Since the characteristic features of the electrocardiogram found in the identifiable may not be detected due to noise, several filtering methods must be used. For primary filtering Z-scaling of data (Table 3) is used, which is based on the mean and standard deviation: dividing the difference between the variable and the mean by the standard deviation [7].

Table 3

## Z-Scaling Results

| Report No | Voltage without Z-scaling, mV | Voltage with Z-scaling, mV | Report No | Voltage without Z-scaling, mV | Voltage with Z-scaling, mV |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|----------------------------|
| 1         | -2,08                         | -1,490960982               | 11        | 0,16                          | 0,089178975                |
| 2         | -1,6                          | -1,152359563               | 12        | 0,16                          | 0,089178975                |
| 3         | -1,36                         | -0,983058853               | 13        | 0,32                          | 0,202046114                |
| 4         | -1,04                         | -0,757324574               | 14        | 0,24                          | 0,145612545                |
| 5         | -0,88                         | -0,644457434               | 15        | 0,4                           | 0,258479684                |
| 6         | -0,64                         | -0,475156724               | 16        | 0,4                           | 0,258479684                |
| 7         | -0,48                         | -0,362289584               | 17        | 0,48                          | 0,314913254                |
| 8         | -0,32                         | -0,249422445               | 18        | 0,8                           | 0,540647534                |
| 9         | -0,16                         | -0,136555305               | 19        | 0,88                          | 0,597081104                |
| 10        | 0                             | -0,023688165               | 20        | 0,48                          | 0,314913254                |

Based on the graph (Fig. 4), we see that the amplitude values were normalized along the axis of the reports.

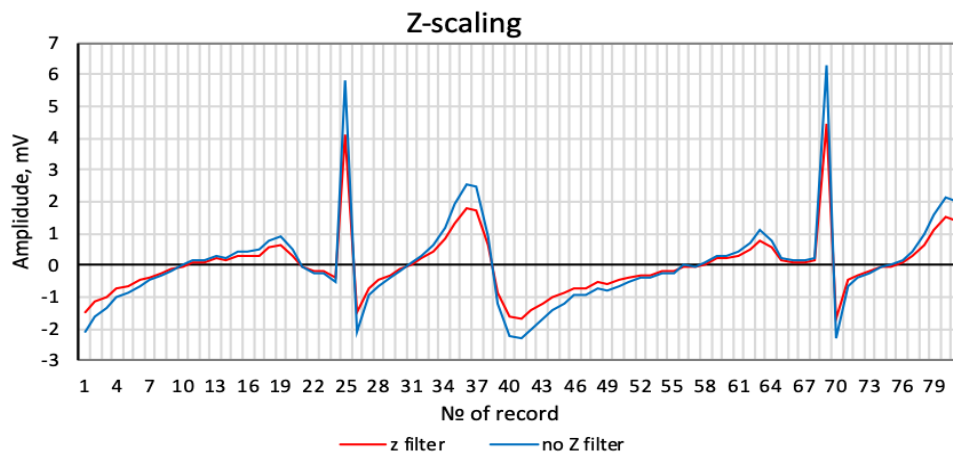


Fig.4. Z-scaling

After normalization the signal from noise can be filtered. All the noise contained in the electrocardiogram can be divided into three groups [8, 9]:

- Low-frequency noise (less than 1 Hz): fluctuation of the baseline caused by breathing, sweating, movement of the subject.
- Influence of the power frequency (50Hz): poor grounding of the electrocardiograph.
- High-frequency noise: the noise of a single heartbeat.

In order to remove such noise, the Butterworth highpass filter is used. The advantage of this filter is the smoothest frequency response at the passband frequencies and its decrease to almost zero at the suppression band frequencies. The Butterworth filter is the only filter retaining the shape of the frequency response for higher orders [10]. The results of applying the filter are shown in Fig. 5. As can be seen from the frequency response, all interference below a frequency of 100 Hz was partially not taken for further analysis

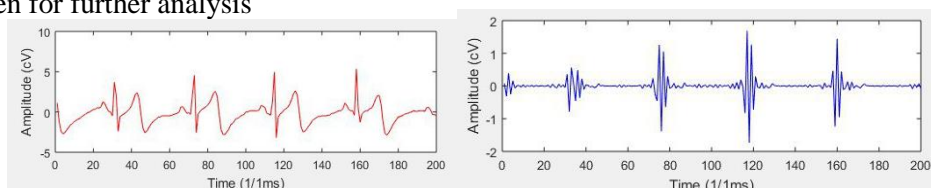


Fig.5. Using the HPF Butterworth



As the basis of the analysis, 30 parameters characterizing the waveform were taken. To reduce the number of parameters and highlight the most individual characteristics, a correlation analysis was used. A combination was obtained consisting of 8 variables describing one ECG pulse [11].

For identification, the method of formal independent modeling of class analogies was applied. This method allows to work with a large number of parameters by classifying spectroscopic data. A graphical representation of the processing circuit of the electrical signal of the heart for biometric identification is shown in Fig. 6.

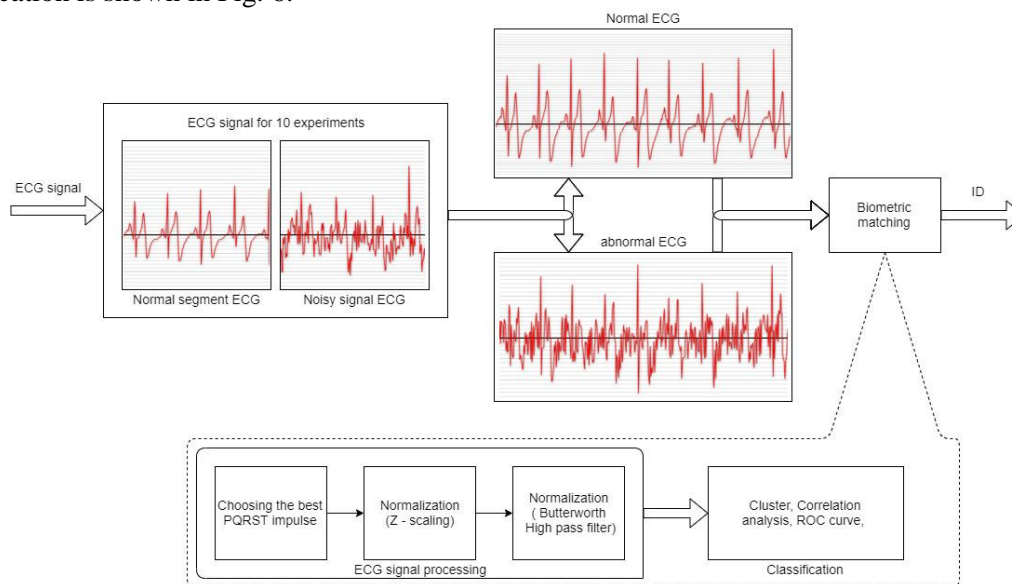


Fig. 6. Block diagram of signal processing

The first step is the principal component method, which is a method of reducing dimensionality or compressing data. As a result of the transition from a large number of variables to a new representation with a significantly lower dimension without loss of data describing the selection. An insignificant part of the data was defined as noise and eliminated. The found main components give an idea of the hidden variables that control the data device.

After constructing the ECG indicators of the main components in space, it is possible to calculate the distance between classes, as well as the distance from each class to a new object. A classification rule is defined in this space and the opportunity arises for identification.

**Conclusions:** Currently the possibilities of biometric identification of a person by ECG have not been sufficiently studied, however, these studies continue to be actively conducted. The main task is to study the possibility of highlighting the individual characteristics of the electrical activity of the human heart. Feature extraction usually consists of forming a template of relevant components, where some features are discarded, and only those, the statistical analysis method of which, showed the greatest increase in variance remain. This work also shows the high potential of using ECG for authentication with low-cost sensors, which allows developers to integrate them into automated medical systems to minimize errors in diagnostics, laboratory studies and to eliminate data falsification.

## References

1. Биометрия: учеб. пособие / Л. В. Горбунов, Н. Ф. Клещев. – Х. : НТУ «ХПИ», 2014. – 160 с
2. Matos, A. C., Lourenco, A., & Nascimento, J. (2013). Biometric recognition system using low bandwidth ECG signals. 2013 IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom 2013).
3. Sidek, K. A., Khalil, I., & Jelinek, H. F. (2014). ECG Biometric with Abnormal Cardiac Conditions in Remote Monitoring System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 44(11), 1498–1509. doi:10.1109/tsmc.2014.2336842
4. Kumar, S. Saravana and Bipan Kaushal. "ECG Biometric Identification - A Review." (2017).
5. Яковенко И. А., Ключко Т. Р., Пельх А. Н., Леус Е. А. Повышение достоверности неинвазивного анализа макроэлементов в крови методом цифровой обработки ЭКГ // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2010. №42.

6. Яковенко И. А. Повышение достоверности неинвазивного анализа макроэлементов в крови методом цифровой обработки ЭКГ / И. А. Яковенко, Т. Р. Клочко, А. Н. Пельх, Е. А. Леус // Вісник НТУУ "КПІ". Серія радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. Вип. 42. – С. 144-152.

7. Artificial intelligence could use EKG data to measure patient's overall health status [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/08/190827084744.htm>.

8. Биометрическая идентификация, основанная на ЭКГ. // Вестник РГМУ. – 2016. – С. 38–42.

9. Идентификация субъектов по ЭКГ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://pandia.ru/text/79/497/2842.php>

10. Расчет и проектирование цифровых фильтров: [учеб. -метод. пособие] / в. г. коберниченко. — екатеринбург : изд-во урал. ун-та, 2013. — 64 с.

11. Сабанов А. Г. Сравнительный анализ методов биометрической идентификации личности / А. Г. Сабанов, С. Г. Смолина // Труды ИСА РАН / А. Г. Сабанов, С. Г. Смолина., 2016. – С. 11–20.

**Яковенко І.О., Рудий О.Д., Турчина М.О.**

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

#### **ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМИ ДЛЯ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ**

*В останні роки спостерігається необхідність у використанні біометричної аутентифікації, яка за допомогою біологічних характеристик людини підтверджує її особу. Дані системи мають високий рівень захисту, так як оцінюють фізичні параметри і характеристики конкретної особистості. У роботі розглядалася біометрична схема, заснована на електричній активності людського серця у формі сигналів електрокардіограми (ЕКГ). Було виконано дослідження за допомогою стенду для медичних вимірів KL-720 протягом деякого часу, у пацієнтів певної вікової групи з одними і тими ж початковими умовами реєструвалася ЕКГ. В результаті отриманий сигнал електричної активності серця мав ряд артефактів і шумів. Завданням даної роботи було провести фільтрацію знятого сигналу для подальшого використання біометричними системами ідентифікації особистості.*

**Ключові слова:** електрокардіограма, біометрична ідентифікація, аутентифікація, параметри ЕКГ, високочастотний шум, низькочастотний шум, Z-масштабування, ФВЧ Баттерворда.

**Яковенко И.А., Рудой А.Д. Турчина М.О**

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

#### **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ ДЛЯ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ**

*В последние годы наблюдается необходимость в использовании биометрической аутентификации, которая с помощью биологических характеристик человека подтверждает его личность. Данные системы имеют высокий уровень защиты, так как оценивают физические параметры и характеристики конкретной личности. В работе рассматривалась биометрическая схема, основанная на электрической активности человеческого сердца в форме сигналов электрокардиограммы (ЭКГ). Было выполнено исследование с помощью стенда для медицинских измерений KL-720 на протяжении некоторого времени, у пациентов определенной возрастной группы с одними и теми же начальными условиями регистрировалась ЭКГ. В результате полученный сигнал электрической активности сердца имел ряд артефактов и шумов. Задачей данной работы было провести фильтрацию снятого сигнала для дальнейшего использования биометрическими системами идентификации личности.*

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, биометрическая идентификация, аутентификация, параметры ЭКГ, высокочастотный шум, низкочастотный шум, Z-масштабирование, ФВЧ Баттерворда.

УДК 537.82

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-19>

Л.В. Ящинський, Д.А. Захарчук, Ю.В. Коваль, Л.І. Панасюк

Луцький національний технічний університет

### ДІАГНОСТИКА ЯКОСТІ ГАРТУВАННЯ КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

*Розроблена та випробувана дешева, проста і достатньо точна методика та експериментальна установка для контролю якості гартування сталевих виробів циліндричної форми в реальному часі, тобто відразу при виході готових виробів з процесу гартування.*

*Досліджено вплив певного ступеня гартування кілець підшипників на електрорушійну силу взаємної індукції у вимірjuвальній котушці. Отримано експериментальні результати значень електрорушійної сили взаємної індукції для кілець різних серій.*

*За експериментальними даними визначено інтервали значень електрорушійної сили взаємної індукції для якісно загартованих кілець різних серій. Показано методику відбору якісно загартованих кілець підшипників за відомими параметрами для певної серії зразків.*

**Ключові слова:** електромагнітна індукція, взаємна індукція, змінне магнітне поле, поверхневий електричний опір, гартування.

**Вступ.** При виробництві різноманітних механічних систем, що обертаються, постійно існує необхідність контролю якості гартування сталевих зубчатих коліс, втулок та підшипників.

Метою термічної обробки є надання сталевим деталям таких властивостей, які забезпечують їх тривалу роботу без руйнування. Якість деталей в результаті термічної обробки залежить від ряду причин, до яких можна віднести наступні:

1) вміст вуглецю, що впливає на твердість при гартуванні деталей струмами високої частоти [1]. Залежно від вмісту вуглецю в сталі при загартуванні отримують різну кількість мартенситу і, отже, різну твердість. Крім того, підвищений вміст вуглецю в сталевих виробах може привести до збільшення їх крихкості через підвищення твердості серцевини понад встановлену норму. Знижений вміст вуглецю в гартованих сталях приводить до неповного загартування. В результаті цього, після відпуску, деталь може мати твердість, передбачену технічними умовами експлуатації, проте межа витривалості буде знижена через наявність в структурі сталі фериту – слабкої за механічними властивостями складової;

2) відхилення вмісту інших елементів, що входять до складу найбільш уживаних сталей, таких як хром, нікель, марганець, кремній, в діапазоні 0,1-0,2% [2, 3], також впливає на якість виробу;

3) наявність в металі тріщин, раковин, шлакових включень, що порушують однорідність металу, створюють в місцях їх знаходження осередків руйнування;

4) температурний режим процесу, від якого залежить структура сталевих виробів.

Відомо, що надійними та науково обґрунтованими методами контролю якості гартованих сталевих виробів є металографічний контроль та рентгеноструктурний аналіз. Проте, використання цих методів передбачає великі затрати часу, як на підготовку зразків, так і на сам контроль якості. Тому дані методи використовуються для окремих виробів з серії чи з певного технологічного процесу.

Зважаючи на вищесказане, метою роботи була розробка дешевої, простої, достатньо точної методики та експериментальної установки для контролю якості гартування сталевих виробів циліндричної форми певної серії в реальному часі, тобто відразу при виході готових виробів з процесу гартування.

#### **Теоретична частина.**

При проходженні по провіднику змінного струму, навколо нього виникає змінне магнітне поле. Побудуємо пристрій, який складається з двох котушок, що знаходяться на одому сердечнику поблизу одна до одної (рис. 1).

Котушка I із змінним струмом створює змінне магнітне поле, а отже і змінний магнітний потік через котушку II [4].

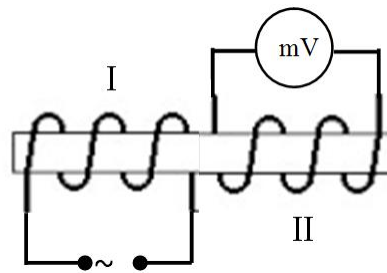


Рис. 1. Пристрій для демонстрації явища взаємної індукції

У відповідності із законом Фарадея у другій котушці індукуються електрорушійна сила взаємної індукції, яка визначається за формулою:

$$\varepsilon_2 = -M_{1,2} \frac{dI_1}{dt}, \quad (1)$$

де  $\frac{dI_1}{dt}$  – зміна з часом величини сили струму в першій котушці,  $M_{1,2}$  – коефіцієнт взаємної індукції або взаємна індуктивність котушок I і II.

Якщо розмістити на спільному сердечнику між котушками I і II замкнутий провідник (рис. 2), то змінний магнітний потік ( $\Phi_{m,1}$ ), створений змінним струмом першої котушки, індукуює у замкнутому провіднику (сталюму кільці – К) змінний струм, який за правилом Ленца створить власний магнітний потік ( $\Phi_{m,K}$ ) протилежного напрямку.

Виходячи з вище сказаного, другу котушку буде перетинати сумарний магнітний потік, який в кожний момент часу чисельно рівний:  $\Phi_{m,2} = \Phi_{m,1} - \Phi_{m,K}$ .

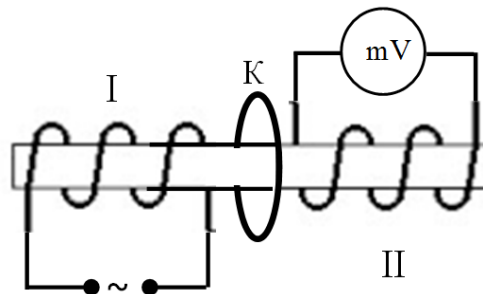


Рис. 2. Пристрій для демонстрації впливу додаткового замкнутого провідника на електрорушійну силу взаємної індукції у другій котушці

Зменшення сумарного змінного магнітного потоку через другу котушку, відповідно до закону Фарадея, приведе до зменшення електрорушійної сили взаємної індукції у другій котушці, що формально означає зменшення коефіцієнта взаємної індукції або взаємної індуктивності котушок I і II.

Зауважимо, що величина індукваного змінного струму у сталюму кільці також залежить від електричного опору його поверхневого шару, так як зовнішнє змінне магнітне поле проникає у сталь лише на певну глибину [5] (див. таблицю 1).

Таблиця 1

Глибина проникнення змінного магнітного поля у сталь

| Частота, Гц | Глибина проникнення, мм |
|-------------|-------------------------|
| 50          | 1,8                     |
| 100         | 1,1                     |
| 1000        | 0,35                    |

У свою чергу, опір поверхневого шару сталюого кільця залежить від його структури, яка визначається якістю гартування.

**Експериментальна частина.** Для експериментів вибрано зразки зовнішніх кілець різної конфігурації для підшипників кочення [6]. Набір зразків складався з чотирьох серій кілець різної конфігурації: 1.1 – 1.6; 2.1 – 2.6; 3.1 – 3.4; 4.1 – 4.6. Кожна серія включає в себе: а) негартвані зразки: 1.1, 2.1, 3.1, 4.1; б) недостатньо загартвані зразки: 1.2, 2.2, 3.2, 4.2; в) якісно загартвані зразки з допустимим розкидом умов гартування (по три з кожної серії): 1.3 – 1.5, 2.3 – 2.5, 3.3 – 3.5, 4.3 – 4.5; г) перегартвані зразки: 1.6, 2.6, 3.6, 4.6.

Зовнішній вигляд окремих зразків різних серій представлений на рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд окремих зразків різних серій

Ступінь гартування кожного із зразків визначалась у заводській лабораторії відповідними методами металографічного контролю і була надана нам у готовому вигляді.

У відповідності з експериментальними результатами металографічного контролю, ступінь гартування кілець підшипників суттєво впливає на структуру поверхневого шару сталі, а отже і на його опір. У свою чергу, опір поверхневого шару кільця визначає (при інших однакових умовах) величину індукційного струму у ньому, який за правилом Ленца впливає на сумарний змінний магнітний потік через котушку II.

Виходячи з вище сказаного, була створена експериментальна установка для вимірювання електрорушійної сили взаємної індукції у котушці II при введенні на спільний сердечник кільця з відповідним гартуванням його поверхневого шару, а також без такого введення.

Експериментальна установка представлена на рис. 4.

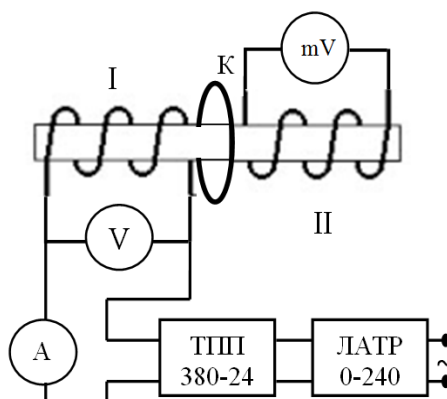


Рис. 4. Електрична схема дослідної установки

Використано довгий сердечник, на який намотано дві котушки (I і II). Котушка I має 50 витків мідного дроту діаметром 1,2 мм, котушка II – 12 витків мідного дроту діаметром 0,3 мм. Намагнічуюча котушка II ввімкнена в побутову мережу змінного струму частотою 50Гц через трансформатор ТПП 380-24 за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР 0-240. Для контролю живлення намагнічуючої котушки використано амперметр (А) та вольтметр (V) ВР-11, а для вимірювання електрорушійної сили взаємної індукції у котушці II використано мілівольтметр (mV) В7-35 з великим вхідним опором.

Понижуючий трансформатор ТПП 380-24 використаний тому, що такі трансформатори (а також і ЛАТР 0-240 ) при вхідній напрузі 380 В (для ЛАТРа – 220 В) працюють при індукції близькій до насичення [7]. При цьому напруга на виході таких приладів має високий рівень гармонік, що знижує точність вимірювання.

Подаючи лабораторним автотрансформатором (ЛАТР 0-240) на вхід трансформатора (ТПП 380-24) напругу порядку 100 В, на виході одержуємо змінну напругу із значно меншим спотворенням синусоїдальної форми. Крім того, напруга менше 24 В у колі дослідної установки є безпечною для використання.

Методом підбору для отримання найбільшого значення ЕРС взаємної індукції, намагнічуюча (I) та вимірювальна (II) котушки розміщувались на сердечнику діаметром 2 см на відстані 5,5 см одна від одної. Кільця, висотою від 2 см до 4,5 см, встановлювались так, щоб їх верхній край знаходився на рівні нижнього краю котушки II.

Величину струму у намагнічуючій котушці підбирали такою (2-2,7 А), щоб величина ЕРС взаємної індукції у вимірювальній котушці без впливу кільця була рівна 800 мВ.

#### Результати експерименту.

I. Вимірюючи електрорушійну силу взаємної індукції у вимірювальній котушці для усіх кілець різних серій отримані експериментальні результати, які для першої серії кілець підшипників представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні результати ЕРС взаємної індукції

| № серії та кільця | ЕРС взаємної індукції без кільця (мВ) | ЕРС взаємної індукції з кільцем (мВ) | Якість гартування         |
|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1.1               | 800                                   | 634                                  | не гартоване              |
| 1.2               | 800                                   | 647                                  | недостатньо загартоване   |
| 1.3               | 800                                   | <b>661</b>                           | <b>якісно загартоване</b> |
| 1.4               | 800                                   | <b>667</b>                           | <b>якісно загартоване</b> |
| 1.5               | 800                                   | <b>674</b>                           | <b>якісно загартоване</b> |
| 1.6               | 800                                   | 728                                  | перегартоване             |
| ...               |                                       |                                      |                           |

Аналіз експериментальних результатів, які представлені у таблиці показує, що зі збільшенням ступеня гартування для кілець усіх серій значення електрорушійної сили взаємної індукції у вимірювальній котушці зростає. Це пояснюється тим, що при гартуванні змінюється кристалічна структура поверхневого шару (1-2 мм) кільця, що передбачає зміну відсоткового вмісту атомів вуглецю в такій структурі. Такі зміни приводять до зростання електричного опору поверхневого шару кільця, а значить до зменшення величини індукційного струму в ньому. У відповідності з правилом Ленца, зменшення індукційного струму у кільці приводить до зменшення компенсації змінного магнітного потоку створеного котушкою I, а значить до збільшення сумарного магнітного потоку через вимірювальну котушку (II). Вище описаний механізм і приводить до зростання ЕРС взаємної індукції у вимірювальній котушці при зростанні ступеня гартування кілець підшипників.

Отримані експериментальні результати дозволили одержати інтервали значень електрорушійної сили взаємної індукції для якісно загартованих кілець підшипників різних серій: серія 1 (зразки 1.1 – 1.6): 661-674 (мВ); серія 4 (зразки 4.1 – 4.6): 645-658 (мВ).

II. Маючи наперед відомі значення інтервалу ЕРС взаємної індукції для якісно загартованих кілець підшипників певної серії та провівши вимірювання за вище описаною методикою можна з достатньою достовірністю в режимі реального часу відібрати якісні зразки з великої кількості кілець даної серії.

#### Висновки.

1. Розроблена та випробувана дешева, проста і достатньо точна методика та експериментальна установка для контролю якості гартування сталевих виробів циліндричної форми в реальному часі, тобто відразу при виході готових виробів з процесу гартування.

2. Досліджено вплив певного ступеня гартування кілець підшипників на електрорушійну силу взаємної індукції у вимірювальній котушці.
3. Отримано експериментальні результати значень ЕРС взаємної індукції для кілець різних серій.
4. За експериментальними даними визначено інтервали значень ЕРС взаємної індукції для якісно загартованих кілець різних серій.
5. Показано методику відбору в режимі реального часу якісно загартованих кілець підшипників з великої їх кількості за відомим інтервалом значень ЕРС взаємної індукції для якісних зразків даної серії.

#### Інформаційні джерела

1. Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Заблоцький В.Ю., Захарчук Д.А. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликотпідшипників методом переривчастого шліфування. – Луцьк: Вежа-друк, 2017. – 128 с.
2. Електронний ресурс: <http://obrobka.pp.ua/2055-kontrol-yakost-termchnoyi-obrobki-stalevih-detaley.html>.
3. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. – М.:Машиностроение, 1990. – 268 с.
4. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. – К.: Либідь, 2006.- 487 с.
5. Електронний ресурс: <http://www.ntpo.com/fizika/38797-materialy-dlya-magnitnyh-ekranov.html>.
6. Ящерицын П.И. Планирование эксперимента в машиностроении. – Минск: Высшая школа, 1985. – 200 с.
7. Електронний ресурс: <https://samelectrik/elektrosnabzhenie/elektrolab.html>.

**Л.В. Ящинский, Д.А. Захарчук, Ю.В. Коваль, Л.И. Панасюк.**

#### **ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ЗАКАЛИВАНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

*Разработана и испытана дешевая, простая и достаточно точная методика и экспериментальная установка для контроля качества закаливания стальных изделий цилиндрической формы в реальном времени, то есть сразу при выходе готовых изделий из процесса закаливания.*

*Исследовано влияние определенной степени закаливания колец подшипников на электродвижущую силу взаимной индукции в измерительной катушке. Получены экспериментальные результаты значений ЭДС взаимной индукции для колец разных серий.*

*По экспериментальным данным определены интервалы значений ЭДС взаимной индукции для качественно закаленных колец разных серий. Показано методику отбора качественно закаленных колец подшипников по известным параметрам для определенной серии образцов.*

**Ключевые слова:** электромагнитная индукция, взаимная индукция, переменное магнитное поле, поверхностное электрическое сопротивление, закаливание.

**L.V. Yashchynskyy, DA Zakharchuk, Yu.V. Koval, L.I. Panasyuk**

#### **DIAGNOSIS OF QUALITY OF HARDENING OF BEARING RINGS USING THE PHENOMENON OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION**

*The inexpensive, simple and sufficiently accurate methodology and experimental setup for controlling the quality of hardening of steel products of cylindrical shape in real time, that is, at the time of leaving the finished products from the tempering process, has been developed and tested.*

*The influence of a certain degree of hardening of the bearing rings on the electromotive force of mutual induction in the measuring coil is investigated. The experimental results of values of electromotive force of mutual induction for rings of different series were obtained.*

*According to the experimental data, the intervals of values of electromotive force of mutual induction for qualitatively tempered rings of different series were determined. The technique of selection of qualitatively hardened bearing rings from a large number of them by known parameters for a certain series of samples is shown.*

**Keywords:** electromagnetic induction, mutual induction, alternating magnetic field, surface electrical resistance, quenching.

**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 колонтитула 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**, 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 **50 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 (ПІБ)**».

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою **confkptm@gmail.com**.

Сайт видання <http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal>

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**.



## 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. 26.12.2019 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.