

Видається з 1996 року

Засновник і видавець
Сумський національний аграрний
університет

Реєстраційне свідоцтво
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

Редакційна колегія серії

Тарельник В.Б., доктор технічних наук, професор, головний редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна)
Соларьов О.О., кандидат технічних наук, доцент, заступник головного редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Думанчук М.Ю., Сумський національний аграрний університет, відповідальний секретар (Україна)

Антошевський Б., доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

Кундера Чеслав, доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

Кирик Г.В., доктор технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Лобода В.Б., кандидат фізико-математичних наук, професор, заступник редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Довжик М.Я., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Конопляченко Є.В., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Хінек Рубік, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

Девід Херак, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

Сабадаш С.М., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»
Випуск 3 (45), 2021

ЗМІСТ

Дубнюк В. Л., Котляров В. П., Романенко В. В., Козирєв О. С. Залучення студентів до науково-технічних гуртків – шлях до покращення конструкторської підготовки.....	3
Єрмаков С. В., Гуцол Т. Д., Потапський П. В., Гарасимчук І. Д. Структурування процесу автоматизації садіння живців енергетичної верби.....	10
Зубко В. М., Хворост Т. В., Литвиненко Є. Є. Дослідження ефективності використання системи Smart Firmer за вирощування кукурудзи на зерно.....	18
Konoplianchenko Ye. V., Chibiryak Ya. I., Song Zhaoyang, Chernenko P. V., Rymas O. V. Formalization of kinematic structures synthesis of products disassembly mechatronic systems at the complex equipment repair stage.....	24
Nuianzin V. M., Maiboroda A. O., Kropyva M. O. Study of the influence of gas exchange on the efficiency of fire extinguishing using carbon dioxide.....	32
Пуховський Є. С. Розробка системи автоматизованого проектування гнучкого автоматизованого виробництва.....	40
Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Стрілецький Ю. Й. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромовання на експлуатаційні властивості покриттів.....	48
Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В. Використання частотного перетворювача – дієвий та зручний спосіб регулювання швидкості насосного агрегату.....	57



Видавничий дім
«Гельветика»
2021

Науковий журнал
«Вісник Сумського національного
аграрного університету.
Серія: Механізація та автоматизація
виробничих процесів»
внесений до переліку наукових
фахових видань України
(категорії «Б») у галузі технічних наук
(131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»,
208 «Агроінженерія»)
на підставі Наказу Міністерства
освіти і науки України № 1188
від 24.09.2020 (додаток 5)

Науковий журнал «Вісник
Сумського національного аграрного
університету» індексується в
Міжнародних наукометричних базах
Index Copernicus, PІNЦ

Матеріали журналу знаходяться
у вільному доступі на сайті
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру
таємного рецензування. До
публікації в журналі не допускаються
матеріали, якщо є достатньо підстав
вважати, що вони є плагіатом.
Відповідальність за точність
наведених даних і цитат
покладається на авторів.
Матеріали друкуються українською
та англійською мовами.
У разі цитування посилання на
«Вісник Сумського національного
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням
вченої ради
Сумського національного
аграрного університету
(Протокол № 2 від 24.09.2021 р.)

Видавництво і друкарня –
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса,
вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (048) 709 38 69,
+38 (095) 934-48-28,
+38 (097) 723-06-08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої
справи ДК № 6424 від 04.10.2018 р.

Тираж 300 пр.
Зам. № 0122/023

© Сумський національний
аграрний університет, 2021

ЗАЛУЧЕННЯ СТУДЕНТІВ ДО НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ГУРТКІВ – ШЛЯХ ДО ПОКРАЩЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ПІДГОТОВКИ

Дубнюк Віктор Леонідович

старший викладач

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0001-6146-9265

v.dubniuk@kpi.ua

Котляров Валерій Павлович

доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0002-2245-9440

kotlyarovv@ukr.net

Романенко Віктор Васильович

кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0003-1918-7090

romvvv@gmail.com

Козирєв Олексій Сергійович

молодший науковий співробітник

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0001-5385-8578

kozyriev.oleksii@iill.kpi.ua

Під час проведення підготовки здобувачів вищої освіти у галузі машинобудування дуже важливо здійснювати потужну практичну підготовку, в межах якої можна підтвердити набуті теоретичні знання та здійснити спробу їх застосування для виготовлення реальних об'єктів. На жаль, у навчальних планах не залишилось місця для будь-якої виробничої практики. Практика, що залишилась, перейшла в розряд непотрібної та безглуздої втрати часу з боку студента, який жодним чином не зацікавлений у набутті нових вмінь та закріпленні вже надбаних. Із боку підприємства також зазвичай нема жодної зацікавленості у якісному проведенні практики. Таким чином, вищий навчальний заклад має самостійно дбати про покращення конструкторської підготовки здобувача. У даній роботі розглянуто вплив участі студентів у гуртках науково-технічного спрямування на успішність засвоєння теоретичних знань. Розглянуто досвід діяльності науково-технічного гуртка «Моделювання складних інженерних систем із застосуванням 3D технологій», який створено при кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського задля пробудження у майбутніх фахівців машинобудівної галузі бажання працювати за обраною спеціальністю; розвинення просторового мислення; висвітлення перспективності інженерної справи для подальшого розвитку особистості та суспільства; окреслення основних напрямів розвитку систем автоматизованого проектування та визначення важливості застосування попереднього моделювання складних інженерних систем. Основою роботи гуртка став 3D-принтер, що здатний друкувати достатньо великі моделі з пластикового філаменту. Наведено приклади робіт з проектування та конструювання вузлів, що виконано гуртківцями, та користь із застосування цих розробок у навчальному процесі для демонстрації майбутнім поколінням студентів готових вузлів. Так гуртківці розробили оптико-механічні вузли з двома лінзами та можливістю юстирування однієї з них; спроектували та виготовили кільканадцять юстирувальних вузлів тощо. Робота студентів у гуртку підвищує зацікавленість студентів у результаті своєї діяльності та ініціює саме творчий підхід до праці. Робота гуртка протягом усього двох років переконливо свідчить про позитивні наслідки залучення студентів до науково-технічних гуртків та необхідність більш активного залучення студентів до лав гуртківців. Доведено високу ефективність застосування методу повного циклу виготовлення виробу – від кресленика до готового вузла – на бажання студента засвоювати нові знання та навички у проектуванні та моделюванні складних вузлів.

Ключові слова: студентський гурток, проектування вузлів, конструювання, моделювання, 3D-друк, покращення результатів навчання, оптико-механічний вузол.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.1>

Вступ. Під час реформування вищої освіти в Україні основною вимогою було зменшення тижневого навантаження на здобувачів вищої освіти, що в першу чергу призвело до значного скорочення аудиторних занять. До

того ж студент половину часу, що виділено на засвоєння дисциплін, має проводити за самостійною роботою з підготовки до занять, виконання індивідуальних завдань, курсового проектування та звітування з лабораторних

робіт, практичних занять тощо. А щодо практики? Раніше студенти проходили через послідовну ланку практик – ознайомчу, конструкторську, технологічну та завершальну переддипломну. А зараз від усієї практичної підготовки залишились 5 тижнів переддипломної практики на першому (бакалаврському) рівні освіти та науково-педагогічна – на другому (магістерському) рівні. І це у той час, коли можливості участі студентів у реальному виробничому процесі збільшились у рази. Зараз існує безліч малих та середніх підприємств, які із величезним бажанням запрошують студентів на роботу і саме роботу за фахом але на робітничі посади, зважаючи на відсутність практичного досвіду.

Ураховуючи сучасні обставини підготовки здобувачів вищої освіти єдиною можливістю поглиблення й, відповідно, покращення практичної підготовки є впровадження наскрізних індивідуальних завдань, які охоплювали б ряд дисциплін і включали поетапне вирішення конструкторських та технологічних задач, що завершувались отриманням інженерного об'єкта наближеного до реальної технологічної системи. Такий підхід вимагає активної співпраці багатьох науково-педагогічних працівників з узгодження індивідуальних завдань з окремих дисциплін.

Наступна можливість покращення практичної підготовки – залучення студентів до наукових та технічних гуртків. Саме в гуртках за інтересом у позакредитний та позааудиторний час студенти можуть (і що дуже важливо, добровільно) поглиблювати теоретичні знання та отримувати нові практичні уміння та навички у створенні реальних інженерних проєктів. Кожний викладач, який має бажання та можливість залучити студентів до додаткової активності, має це робити для передачі свого практичного досвіду та направлення енергії студентів у потрібному напрямі.

Мета роботи. На кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій (ЛТФТ) існував один гурток, що має технологічну направленість, та його діяльність спрямована на пошук нових рішень та модернізацію існуючих технологій у галузі фізико-технічних методів обробки матеріалів. Для підсилення конструкторської підготовки було прийнято рішення про створення ще одного гуртка. Виходячи з його направленості та оснащення, він отримав назву «Моделювання складних інженерних систем із застосуванням 3D технологій» (МСІС).

Основні напрями діяльності гуртка МСІС:

1) розроблення принципово нових конструкцій машинобудівної галузі в цілому та в області фізико-технічних методів обробки зокрема;

2) проєктування інженерних систем будь-якої складності;

3) моделювання технологічного обладнання та устаткування, зокрема для фізико-технічних методів обробки, а саме лазерних технологічних систем, плазмового, електронно-променевого, ультразвукового, електроерозійного та електрохімічного обладнання.

Результати роботи гуртківців. Практична діяльність гуртка МСІС розпочалась у березні 2019 р. і за лише 2,5 роки діяльності гуртківці встигли отримати значні практичні результати. На жаль, у активну діяльність гуртка втрутилась пандемія. Тому очні заняття проходили лише

на першому році його існування. Зараз все відбувається, зазвичай, он-лайн і лише восени, коли відбувається планування річної діяльності гуртка, та навесні, під час підбивання підсумків роботи, гуртківці можуть побачити один одного живцем та доторкнутись до результатів своєї праці. Для висвітлення своєї діяльності гуртківці знайшли гарну постійну платформу, й кожної весни їх напрацювання доповідаються та виходять у вигляді тез доповідей та статей на Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «ІННОВАЦІЇ МОЛОДІ В МАШИНОБУДУВАННІ», яка проводиться кожного року на базі навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Членами гуртка МСІС на даний момент проведено проєктування та моделювання близько двох десятків конструкцій інженерних систем загального застосування та таких, що відносяться до фізико-технічних методів обробки. Розглянемо деякі результати роботи гуртківців.

Чесно кажучи, найперша «розробка» гуртківців була зовсім не складною, але дуже прагматичною – було накреслено та виготовлено комплект брелоків на ключі від кафедральних приміщень (рис. 1), замість жаклих бирочок вирізаних з лінолеуму. І це було дуже доречним кроком. Тепер на вахті навчального корпусу чітко видно де розташовано приміщення кафедри. Друкували брелоки у трьох кольорах – синьому, жовтому та червоному.



Рис. 1. Брелоки на ключі від кафедральних приміщень

Друга розробка виявилась значно складніше першої. Потрібно було підготувати до друку ідею студента, який під час виконання індивідуального завдання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Основи проєктування оптико-механічного вузлів» спроектував вузол з цікавими інженерними рішеннями. У склад вузла входять дві лінзи, які закріплено різьбовими кільцями 1 та 9 у оправах 2 та 8. Оправи обох лінз поєднано у вузол кількома тубусами 3, 4, 5 та 6 (рис. 2) (Moiseienko et al., 2020).

Головною задачею під час створення конструкції вузла юстирування другої лінзи вважалося використання спряжених сферичних поверхонь на оправі другої лінзи 8 (рис. 2) та втулці сферичній 7, за якими лінза має можливість нахилитись навколо центру кривизни сферичних поверхонь, що має співпадати з центром передньої поверхні заломлення лінзи, що дозволяє зменшувати паразитні рухи під час процедури юстирування.

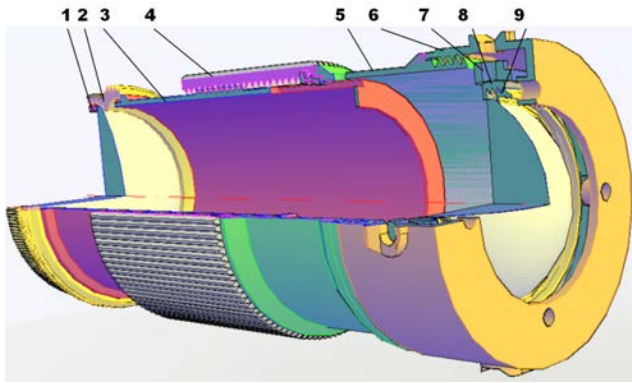


Рис. 2. Оптико-механічний пристрій з вузлом юстирування однієї з лінз: 1 – кільце різьбове; 2 – оправа першої лінзи; 3 – тубус внутрішній; 4 – тубус зовнішній; 5 – тубус проміжний; 6 – кільце зовнішнє; 7 – втулка сферична; 8 – корпус сферичний; 9 – оправа другої лінзи

Для швидкого та зручного складання вузла у конструкції застосовано різьбові з'єднання, а саме метрична різьба, що дуже доцільно у потребі постійної демонстрації деталей та елементів вузла під час аудиторних занять. Задля успішного виготовлення вузла на 3D-принтері необхідно дотримуватись деяких особливих вимог (рис. 3).



Рис. 3. Набір деталей та зовнішній вигляд оптико-механічного пристрою

По-перше, усі різьбові з'єднання потрібно переробити збільшивши крок, інакше немає жодної можливості роздрукувати якісні деталі з функціональною різьбою. По-друге, деталі для якісного друку на 3D-принтері мають конфігурацію, що пояснюється саме застосуванням даної технології виготовлення, яка надає можливість створювати елементи конструкції «заборонені» при традиційних методах обробки з видаленням матеріалу з поверхні заготовки. По-третє, виготовлення друкованих деталей дає можливість економії витратних матеріалів застосовуючи заповнення серцевини деталі зі значними порожнинами застосовуючи стільникову внутрішню структуру, що з іншого боку зменшує міцність конструкції. Також занадто тонкі стінки можуть значно погіршити механічні характеристики змодельованих пластикових деталей порівняно з металевими.

Ще одна цікава розробка гуртківців – це корпус для трансформатора Тесла (рис. 4) (Sokolovskyi et al., 2019).

Під час проектування цього вузла розроблені корпус 1, який з метою полегшення процесу друку складається з кількох окремих деталей, тобто є складальною одиницею, та ще включає чотири деталі – основу 2; тубус 3; кнопку 4 та чотири ніжки 5 (рис. 5, а).

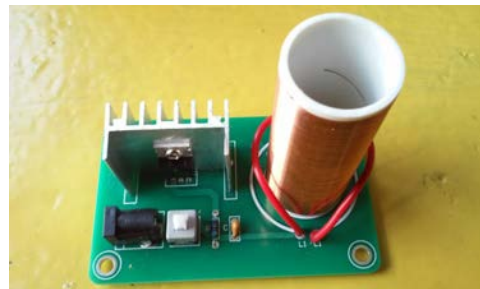


Рис. 4. Електрична плата трансформатора Тесла



Рис. 5. Конструкція корпусу пристрою для передачі енергії на відстань: а) деталі надруковані на 3D-принтері; б) пристрій у зборі; в) роз'єм для джерела живлення; г) вентиляційні отвори; д) ніжки з кріпильними гвинтами; є) захисний тубус високовольтної котушки

У розробленій конструкції корпусу (рис. 5, б) виготовлено отвір для приєднання джерела живлення, що забезпечує електричну схему постійною напругою 12 В (рис. 5, в). Задля ефективного відведення тепла, що утворюється під час роботи пристрою, зокрема закріпленого на радіаторі силового транзистора, у стінках корпусу виготовлено вентиляційні отвори (рис. 5, г). Корпус 1 та основу 2 пристрою з'єднано чотирма гвинтами, що також утримують й опорні ніжки (рис. 5, д). Для забезпечення захисту від можливого ураження електричним струмом при доторканні до котушки вторинної обмотки трансформатора на різьбі встановлено захисний тубус (рис. 5, є).

Як вже було відзначено, вище гуртківці навчаються за освітньою програмою, яка передбачає засвоєння навичок з лазерної техніки та технології, тому багато завдань стосується саме цієї тематики. Так, було завдання спроектувати оптичну систему для концентрації лазерного проміння потужністю 30 кВт на поверхні заготовки, яка характеризується значною довжиною та малими поперечними розмірами (Trapeznikov et al., 2019).

Для концентрації лазерного проміння можливо використовувати оптичні системи, у яких застосовуються лінзові компоненти, дзеркальні або комбіновані. Під час аналізу застосовності оптичних систем було визначено, що комбіновані та лінзові системи використовуються при невеликих потужностях з причини меншої оптичної та енергетичної стійкості та складності забезпечення рівномірного охолодження із застосуванням рідинних холодоагентів. Тому прийнято обґрунтоване рішення проектувати саме дзеркалу оптичну систему, що позбавлена багатьох недоліків та забезпечує стабільні експлуатаційні та оптичні властивості (рис. 6).

Вихідними даними для розробки конструкції оптичної системи було те, що на вході до неї лазерне проміння має круглий переріз, а на поверхні оброблюваної заготовки має бути кільцевим та впливати одночасно за усім

периметром. Таке перетворення лазерного пучка можна забезпечити застосувавши наприклад пласке поворотне дзеркало для змінення напрямку розповсюдження пучка, конічного дзеркала – для отримання пучка з кільцевим поперечним перерізом та параболічного дзеркала – для концентрації проміння на поверхні заготовки. Враховуючи можливі втрати потужності проміння на кожній дзеркальній поверхні близько 2 %, тобто близько 600 Вт, стає зрозумілим потреба у застосуванні їх активного охолодження для стабілізації теплового режиму задля запобігання теплової деформації дзеркал, викривлення дзеркальної поверхні та погіршення концентрації пучка на оброблюваній поверхні.

Під час обговорення у колі експертів було запропоновано до впровадження іншу дзеркальну систему концентрації лазерного проміння, яка відрізняється застосуванням чотирьох дзеркал. З одного боку, це збільшує втрати на поглинання, що потребує активного та інтенсивного охолодження усіх оптичних деталей. З іншого боку, пропонується схема забезпечує кращі умови фокусування та зменшує аберації оптичної системи, не викривляючи просторові (геометрія та форма) та енергетичні (нерівномірний розподіл інтенсивності у поперечному перерізі пучка) властивості. (Klimova et al., 2019).

Дзеркала 2, 8 та 11 (рис. 7) мають порожнини, які герметично закриті кришками 1, 9 та 12, а конус дзеркальний 3 встановлено на холодильнику 4, через який проходить потік охолоджувальної води, яку подається через штуцери 30. Складання вузла відбувається з використанням центрувальних буртиків та деталі з'єднуються шпильками. Для моделювання поверхонь віддзеркалення оптичних деталей застосовується металева фольга.

У конструкції оптичного вузла передбачено застосування соплової системи, яка має важливе значення в оптимальному проходженні технологічного процесу обробки. Соплова система має дві відокремлені

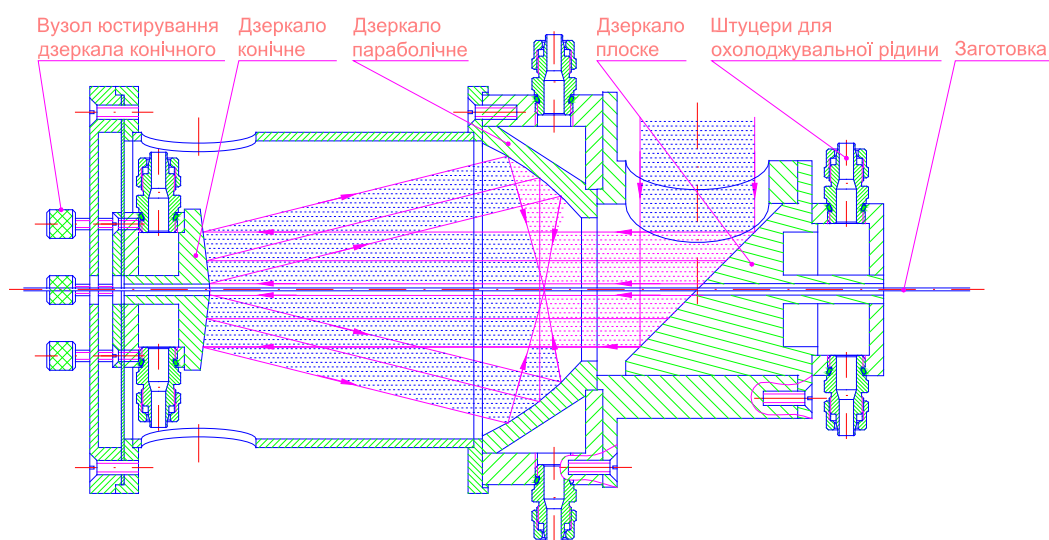


Рис. 6. Спроектована оптична система фокусування проміння технологічного лазера на поверхню оброблюваної заготовки

порожнини у які подаються два технологічні гази. Вони виконують різні функції: один захищає розпечений метал заготовки від дії компонентів повітряної атмосфери у місці впливу лазерного проміння, а другий сприяє швидкому видаленню продуктів руйнування поверхні заготовки з порожнини оптичної системи, охолодження оброблюваної заготовки та додаткового охолодження деталей оптичної системи. Для цього використовуватимуться гелій та азот. Через центральний отвір соплової системи проходитиме оброблювана заготовка. Вузол соплової системи виготовлено за аналогією з вузлом конуса дзеркального 3, що забезпечує уніфікацію деталей та їх взаємозамінність.

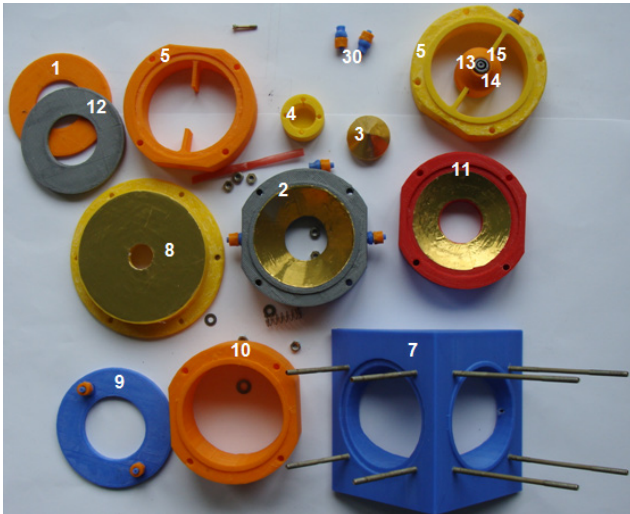


Рис. 7. Надруковані деталі оптичної системи для концентрації лазерного проміння на поверхні оброблюваної заготовки

Таким чином, отримали модель оптичної системи (рис. 8), яку можна використовувати для багатьох завдань: подальших досліджень з проходження лазерного проміння; демонстрації зовнішніх характеристик пристрою та використання під час навчального процесу як наочної моделі складної оптичної системи.

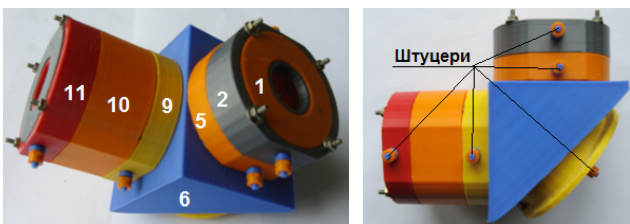


Рис. 8. Зовнішній вигляд моделі спроектованої дзеркальної оптичної системи (позначення згідно рис. 7)

І на завершення можна навести ще приклади розробки простих, але виготовлених у великій кількості оптичних вузлів, кожний з яких має свою цікавинку (рис. 9). Розроблено багато вузлів, що планується у подальшому застосовувати у великому проекті, який триває вже майже два роки і потрохи наближається до свого завершення. Так, розроблено багато юстируваль-

них вузлів для лінз та дзеркал, у яких кожна конструкція дещо унікальна. В одних застосовуються пружини розтягнення або цанговий фіксатор (рис. 9, а), в інших встановлено пружини стискання (рис. 9, б), а треті мають у своїй основі достатньо складний карданний механізм (рис. 9, в) (Yurchenko et al., 2021).

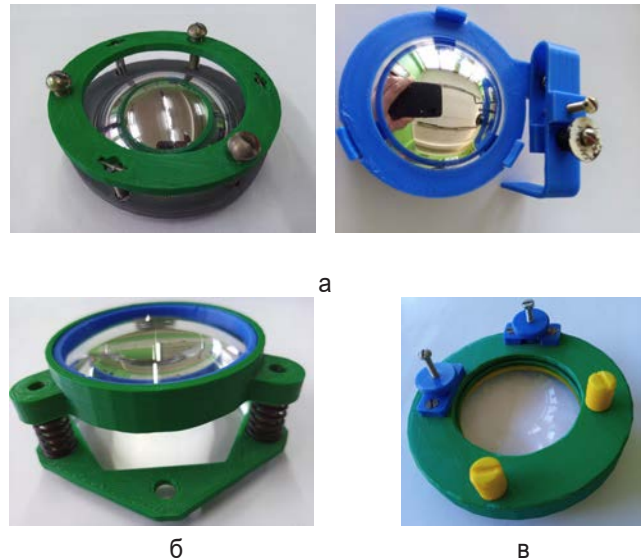


Рис. 9. Зовнішній вигляд моделей пристроїв юстирування: а) дзеркала сферичного; б) лінзи позитивної; в) на основі карданного механізму

Друк усіх наведених конструкцій здійснювався на 3D-принтері з використанням пластикового дрогового матеріалу для 3D-друку – філаменту. Для друку моделей було обрано пластик **АБС** (АкрилонітрилБутадієн-Стирол), який не має чіткої температури плавлення. Для друку на 3D-принтері пластик розігрівається до температури близько 240°C. Цей матеріал є оптимальним для друку моделей деталей та вузлів за доступністю, ціною та простотою використання. Він є нетоксичним, довговічним, вологостійким, має великий діапазон експлуатаційних температур (-40...+90°C), гарні механічні властивості, ударостійкість та пружність.

Висновок. Аналізуючи роботу, що виконано здобувачами вищої освіти за час роботи гуртка інженерного спрямування «Моделювання складних інженерних систем із застосуванням 3D технологій», можна зробити висновки про доцільність залучення студентів до такого роду діяльності. Зрозуміло, що усі студенти не можуть бути охоплені такою роботою виходячи з головного принципу діяльності гуртків – добровільністю. Зазвичай членами гуртка стають студенти з результатами навчання вище середнього рівня. Але інколи студенти-аутсайдери також проявляють зацікавленість у практичній діяльності, що відбувається під час роботи гуртка. Мабуть, саме такий перехід від «сухого» теоретичного навчання до застосування навіть елементарних навичок до реальної справи спонукає студентів проявляти ініціативу, вибухати ідеями та намагатись впровадити їх у життя.

Колись один викладач розповів про передові методи підготовки фахівців у галузі машинобудування

в передових університетах, за якими студент у комп'ютерному класі проектує деталь за індивідуальним завданням, розробляє технологію її виготовлення, відправляє програму обробки на верстат і поки переходить у виробничу майстерню, де знаходиться верстат, заготовка обробляється, викладач бере готову деталь, визначає її розміри та геометрію, порівнює із завданням на проектування та оцінює точність виконання, виставляючи відповідну оцінку. Це дуже гарний метод, але дуже матеріаломісткий. Потрібні металеві заготовки, металообробні верстати з ЧПК, відповідний набір металорізального інструменту та технологічного устаткування, висококваліфіковані інженери з навчального процесу для налагоджування та експлуатації обладнання...

Застосування 3D технологій, зокрема 3D друку з пластику, знімають усі ці матеріально-технічні проблеми та відкривають необмежені перспективи для творчості, дозволяють миттєво створювати нові неіснуючі раніше вироби. При застосуванні цих технологій з моменту виникнення ідеї створення нового об'єкта інтелектуальної власності, визначення загальних його характеристик, розробки конструкції, виготовлення креслеників та друку моделі проходитимуть лічені години.

Зрозуміло, що поруч із гуртківцями завжди має знаходитись кваліфікований викладач, який бажає працювати зі студентською молоддю. Він має підтримувати той

вогонь, що запалено в душі майбутнього фахівця. Може, саме тому, що сучасна молодь хоче отримати результат швидко, не чекаючи навіть тижня. А ми дивуємось, чому студенти без ентузіазму виконують завдання з курсового проектування та інші індивідуальні завдання – саме тому що вони розтягнуті на цілий семестр, а практично можуть бути виконані протягом кількох тижнів.

Устаткування для проведення усього процесу проектування – комп'ютер і 3D-принтер – може знаходитись поруч, у одному приміщенні. Витрати матеріалів для отримання готової моделі проєктованого об'єкта зовсім незначні та майже не залежать від його складності. Собівартість виробу значно залежить від коштів, що вкладено у придбання основного обладнання. Виготовлена модель дозволяє оцінити переваги та недоліки об'єкта, визначити деякі експлуатаційні характеристики, визначитись зі змінами, які необхідно внести у конструкцію та після відповідного доопрацювання пропонувати виріб у виробництво.

Як показує хоч невеликий, але позитивний досвід діяльності гуртка, його учасники, проходячи додаткову технічну, конструкторську та технологічну практику, набувають нових знань та умінь, що позитивно відбивається на їх впевненості у своїх силах, здатності приймати самостійні інженерні рішення, творчо підходити до рішення багатьох завдань та легкому подальшому працевлаштуванню.

Бібліографічні посилання:

1. Klimova, A.H., Solomon, R.R., Dubniuk, V.L. (2019). Rozrobka konstruktssii ta modeliuvannia optychnoi systemy dlia lazernoho oprominennia tonkykh shvydkorukhomykh zahotovok. [Designing and modeling of optical system for laser irradiation of thin fast-moving workpieces]. Kyiv: Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2019», № 1, 2019, pp. 150–156. ISSN 2708-3926 [in Ukrainian].
2. Moiseienko, H.S., Dubniuk, V.L., Yanovska, S.V. (2020). Proektuvannia dvokomponentnoi systemy peretvorennia lazernoho prominnia. [Designing of a two-component laser beam conversion system]. Kyiv : Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2020», № 2, 2020, pp. 136–143. ISSN 2708-3926 [in Ukrainian].
3. Sokolovskyi, M.V., Dubniuk, V.L. (2019). Proektuvannia ta vyhotovlennia prystroi dlia bezdrotovoi peredachi elektromahnitnoi enerhii. [Design and manufacture of a device for wireless transmission of electromagnetic energy]. Kyiv: Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2019», № 1, 2019, pp. 141–144. ISSN 2708-3926 [in Ukrainian].
4. Trapeznikov, O.P., Dubniuk, V.L. (2019). Vyznachennia parametriv lazernoho oprominennia tonkykh shvydkorukhomykh zahotovok ta proektuvannia optychnoi systemy. [Lasers parameter determination of thin fast-moving workpieces irradiation and optical system design]. Kyiv: Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2019», № 1, 2019, pp. 145–149. ISSN 2708-3926 [in Ukrainian].
5. Yurchenko, Yu.V., Dubniuk, V.L., Yanovska, S.V. (2021). Proektuvannia ta vyhotovlennia prystroi ustyruvannia na osnovi kardannoho mekhanizmu. [Design and manufacture of an adjustment device based on the cardan mechanism]. Kyiv : Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2021», № 3, 2021, pp. 47–52. ISSN 2708-3926 [in Ukrainian].

Dubniuk V. L., Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Kotlyarov V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Romanenko V. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Kozyrev O. S., Junior Research Fellow, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Students engaging in scientific and technical circles is the way to improve design training

During the studying of students in the field of mechanical engineering, it is very important to carry out good practical training, within which they can confirm the acquired theoretical knowledge and try to apply them for the manufacturing

of real objects. Unfortunately, there is no time left for any practice in the curriculum. The remaining practice has passed into the category of unnecessary and senseless time waste by the student, who is in no way interested in acquiring new skills and consolidating what has already been acquired. There is also usually no interest on the part of the enterprises in the quality of the internship. Thus, the higher education institution should take care of improving the design training of the students. In this work the influence of students' participation in scientific and technical workshop on the success of theoretical knowledge acquisition is considered. The experience of the scientific and technical workshop "Modeling of complex engineering systems using 3D technology" is considered, which was created at the Department of Laser Systems and Advanced Technologies of the Ye. O. Paton Institute of Materials Science and Welding of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute to awaken in future specialists of the mechanical engineering the desire to work in the chosen specialty; development of spatial thinking; highlighting the prospects of engineering for the further development of the personality and society; outlining the main directions of development of computer-aided design systems and determining the importance of using preliminary modeling of complex engineering systems. The basis of the workshop was a 3D printer that can print large enough models of plastic filament. Examples of work on the design and construction of units are given that workshop members performed and the benefits of using these developments in the educational process to demonstrate ready-made units to future students' generations. Thus, the members of the workshop developed optical-mechanical units with two lenses and the adjustment of one of them; designed and manufactured several adjustment units, etc. The work of students in the workshop increases the interest of students as a result of their activities and initiates a creative approach to work. The workshop has been operating for only two years convincingly evidence of the positive consequences of involving students in scientific and technical workshop and the need for more active involvement of students in the ranks of workshop members. High-efficiency of application of the full cycle method of product manufacturing – from the drawing to a ready unit – at the student's request to acquire new knowledge and skills in designing and modeling of difficult units is proved.

Key words: student circle, unit design, modeling, 3D-printing, increasing the impact of training, optical-mechanical unit.

Дата надходження 03.09.2021 р.

СТРУКТУРУВАННЯ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗАЦІЇ САДІННЯ ЖИВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЕРБИ

Єрмаков Сергій Володимирович

завідувач навчально-наукової лабораторії «DAK GPS»

Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна

ORCID: 0000-0002-6840-5309

dakgps@pdatu.edu.ua

Гуцол Тарас Дмитрович

доктор технічних наук, доцент

Поліський національний університет, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна

ORCID: 0000-0002-9086-3672

pro-gp@pdatu.edu.ua

Потапський Павло Васильович

кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна

ORCID: 0000-0003-4792-8992

p.v.potap@meta.ua

Гарасимчук Ігор Дмитрович

Подільський державний аграрно-технічний університет

ORCID: 0000-0002-4304-4447

igorgarasymchuk@gmail.com

Енергія біомаси є однією із найперспективніших галузей відновлювальної енергетики передусім через можливість швидкого нарощування обсягів виробництва сировини. Створення нових насаджень енергетичних культур потребує відповідних технічних засобів. А для енергетичної верби чи тополі слід також урахувати особливості садивного матеріалу, яким є здерев'янілі живці довжиною 20-25 см і діаметром 6-16 мм. Відомі машини для садіння живців енергетичних культур характеризуються малою продуктивністю внаслідок обмеження швидкості ручного закладання живців у садильний апарат. Тому створення механізмів для автоматизованого закладання живців у садильні апарати є актуальним науковим і виробничим завданням.

Дослідження ґрунтується на аналізі відомих конструкцій автоматів садіння, що використовуються під час садіння розсади і саджанців для лісу. Під час роботи використовувалися методи структурно-факторного аналізу щодо будови механізмів; виділялись особливості робочих процесів, які відбуваються на кожному з етапів загального технологічного процесу переміщення живців від технологічної ємкості до місця садіння.

Проаналізувавши відомі технічні рішення про садіння лісу, розсади, горшкових матеріалів і живців енергетичних культур, відмічено, що найбільш проблемною є позиція, що відповідає за подачу живців від ємкостей із розсадою до місця садіння. У сучасних машинах для садіння енергетичної верби цей процес виконується винятково вручну. Інформаційно-логічні пошуки призвели до синтезування структурно-логічної схеми технологічного процесу автоматизованого садіння. Згідно із цією схемою, основними операціями, які необхідно реалізувати в автоматі садіння, є звуження потоку живців, поштучний відбір, орієнтування і транспортування садивного матеріалу до місця садіння. Виокремлено перспективні способи автоматизації садіння живців енергетичних культур і можливі проблеми на шляху до їх реалізації.

Ключові слова: автомат садіння, саджалка, механізм подачі, касетний механізм, садильний апарат, енергетична верба.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.2>

Вступ. Поширення енергетичних стратегій щодо збільшення частки відновлювальної енергії у загальній структурі енергоспоживання країн змушує звертати увагу на такі види поновлювальних джерел, як енергія біомаси. Важливим напрямком розвитку цього є виробництво палива та енергії із швидкорослих енергетичних рослин, що, у свою чергу, зумовлює необхідність створення високопродуктивних машин для закладання насаджень енергетичних культур, що потребує перегляду технічних засобів для виконання технологічних процесів вирощування біомаси і пошуку шляхів покращення їхньої продуктивності.

Однією із пріоритетних енергетичних культур для освоєння є верба, здатна за короткий час продукувати значну кількість біомаси, невибаглива до рельєфу і структури ґрунтів, добре пристосована для кліматичних умов України, досить технологічна щодо зручності вирощування і збирання врожаю. Специфікою цієї культури є те, що у промислових цілях вона розмножується вегетативним способом. Оптимальним садивним матеріалом для створення енергетичних плантацій верб є однорічні здерев'янілі живці завдовжки 20–30 см і завтовшки 5–15 мм (Frączek et al., 2005), які можна розглядати як стрижне-

подібні об'єкти, проте під час роботи з ними слід урахувати можливі нерівності, конусність, наявність вічок на бічній поверхні (рис. 1). Такий садивний матеріал заготовляють із однорічних пагонів верби. Для садіння одного гектара потрібно 15–20 тис. живців, а під час закладання маточних насаджень – до 30 тис. (Roik et al., 2015).

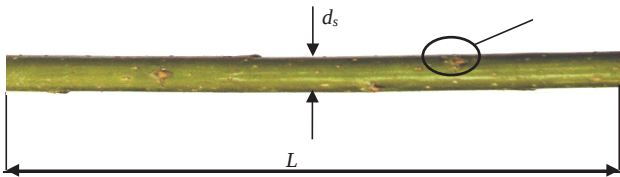


Рис. 1. Живець енергетичної верби: d_s – діаметр живця, виміряний на половині довжини, L – довжина живця, 1 – вічка на бічній поверхні розсади

Для швидкого закладання «плантації» енергетичної верби потрібна машина для садіння, яка б могла працювати із таким матеріалом. Машини для садіння енергетичної верби, наявні нині, можна поділити на дві групи: із використанням живців відповідного розміру та із закладанням довгих прутів верби (2,5...6 м) із розрізанням їх самою машиною саме перед садінням у борозну (Wrobel et al., 2018; Sinchenko et al., 2015). Проте в усіх відомих машинах для садіння верби для закладки садивного матеріалу використовується праця садівника. Розроблення автомату садіння суттєво розширило би можливості збільшення продуктивності агрегата, усуваючи людський фактор під час його виконання.



Рис. 2. Садивний матеріал енергетичної верби: а) у разі садіння прутами ($l = 2,5\text{--}6,0$ м), б) у разі садіння завчасно підготовленими живцями ($l = 20\text{--}25$ см)

Рішення цього питання можна знайти у галузях, де використовується такий садивний матеріал, зокрема у лісівництві та садінні розсади.

Стосовно проблеми вдосконалення складного і трудомісткого процесу садіння розсади і деревних культур уже понад століття робота триває за кількома напрямками, починаючи від поліпшення окремих робочих органів саджалок і до спроб автоматизувати процес, що дозволить звільнитися від ручної праці та негативних чинників, які впливають унаслідок її використання (поріг продуктивності подачі садивного матеріалу, залежність якості від фізіологічного стану оператора тощо). Водночас над удосконаленням роботи саджалок працюють як цілі наукові інститути країн, так і окремі науковці та дослідники, які пропонували власні конструкції саджалок із автоматизованим виконанням процесу. Щоправда, перші спроби автоматизувати процес садіння зводилися переважно до використання різних транспортерів подачі. Водночас розсада заздалегідь закладалась у спеціальні стрічки із гніздами, пружними тримачами чи іншими утримуючими пристосуваннями. Стрічка згортається у рулон (касету), під час розгортання рулону стрічка переміщується на крок, кратний кроку садіння; розсада по чергово вихоплюється зі стрічки захватами садильного апарату і спрямовується до місця садіння. Таким чином, послідовність, ритмічність і крок подачі садивного матеріалу формується і забезпечується параметрами стрічки, переміщення якої змінює як загальне положення, так і орієнтування його у просторі. Основним недоліком таких автоматів є велика трудомісткість «заряджання» рослин у стрічки касет, через що цю операцію перенесено з основного процесу; її виконують заздалегідь перед садінням. Окрім цього, наявність касетного механізму підвищує складність конструкції саджалок та їхню громіздкість, а також знижує надійність виконання процесу через такі недоліки касетних механізмів, як сходження зі стрічок опорних направляючих роликів і працездатність елементів кріплення рослин у стрічці.

Такий спосіб автоматизації процесу і нині є актуальним, зокрема відомі такі касетні автомати, як ПЛА-1 (рис.3а), АПА-1, які успішно використовуються під час садіння саджанців лісових культур.

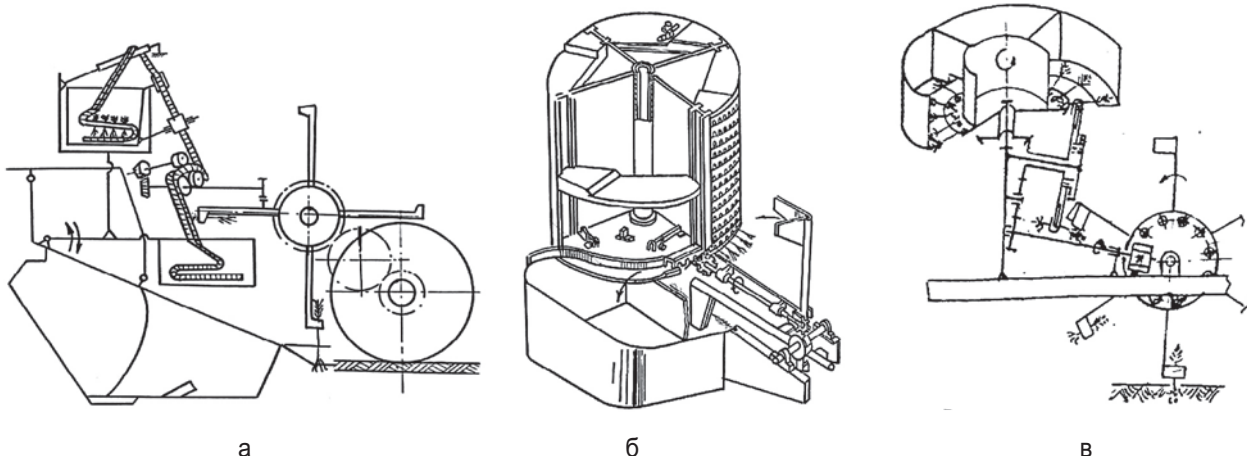


Рис. 3. Автомати садіння: а) із гнучкою касетою (ПЛА-1); б) із жорсткою касетою (АПП-1); в) автомат АБС-6 без касети для сіянців

Подібний принцип роботи мають автомати із жорсткими касетами, які виконуються у вигляді плоских елементів (автомат ЛДМ-21) або барабанів (автомат АЛП-1, зображений на рис.3б). Головною їх відмінністю є дугове переміщення касет на крок подачі до місця відбору садивного матеріалу захватами садильного апарату (Bartenev, 2012). Тут формування маси садивного матеріалу визначається параметрами жорстких касет, а переміщення – режимами їх обертання.

Садильні автомати із жорсткими касетами порівняно з автоматами із гнучкими касетами є компактнішими і не вимагають додаткового переміщення під час зарядки сіянцями. Водночас операції подання касет із бункера до захватів садильного апарату саджалки і звільнення касети від сіянців потребують додаткового вивчення для кожного садивного матеріалу.

Як і у випадку із гнучкими касетами, вагомим недоліком такого способу є необхідність попереднього «зарядження» касет. Це вимагає розроблення додаткових механізмів, адже ручна зарядка стрічки потребує багато часу, наприклад, зарядження стрічки із гніздами на 2000 рослин німецької машини «Шонхер» тривало 3,5 години (Evseev, 1977). Отже, загальні витрати часу на виконання процесу садіння рослин мало змінюються, тому говорити про ефективність касетних механізмів подачі рослин можна лише у контексті роботи тільки садильного агрегату.

До загальних недоліків касетних автоматів подачі відносять також тривалий час перебування рослин на повітрі, що важливо для деяких видів садивного матеріалу, зокрема із відкритою кореневою системою. Цей час не повинен перевищувати п'яти хвилин, інакше різко знижується приживаність рослин і сповільнюється їхній ріст (Bartenev, 2012; Yermakov, Borys, 2016; Yermakov, 2018). Фактично рослину перед садінням витримують не лише протягом технологічного часу, коли її переміщують із бункера на місце садіння, але і часу, пов'язаного із технічними зупинками внаслідок усунення несправностей, що виникають.

Суттєвим недоліком касетних автоматів є також те, що для забезпечення їх роботи потрібен ретельний відбір сіянців із загальної маси за розмірами, будовою кореневої системи і крони тощо. Інші сіянці вибраковуються

і їхнє висаджування потрібно виконувати ручними способами. Зазвичай частка такого матеріалу становить до 50% (Bartenev, 2012; Yermakov et al., 2018).

Технічні рішення з автоматизації процесу садіння відомі у разі садіння розсади у горщики. За такої умови розсаду заздалегідь вирощують у спеціальних касетах із комірками, звідти розсаду подають до підготовленого місця садіння. Однакова форма горщиків, яка чітко орієнтує розсаду у вертикальній площині, дозволяє краще використовувати цю властивість під час завантаження. Зокрема, задля усунення залежності якості виконання процесу від можливостей людини у поштучному відборі предметів (як зазначалося, людина може відібрати 40-60 шт. за хвилину без належної однорідності відбору і швидко втомитися через монотонність роботи), створюються умови для більш зручного встановлення розсади. Для цього перед садильним апаратом створюється деякий запас садивного матеріалу, який накопичується у спеціальних розподільниках (карусельного (рис. 4б) або револьверного (рис.4а) типу), або на скатних дошках (рис.4в). Цей запас створюється людиною, але без жорстких умов за ритмічністю (однаковий час між сіянцями) і з можливістю відбору не поштучно, а блоками. Звідти розсада автоматично із заданими параметрами видається у садильний апарат. Такі машини у садінні розсади називаються semi-automat. Отже, такі пристосування можуть суттєво збільшити продуктивність садіння, підвищити якість надходження садивного матеріалу до місця садіння (точну орієнтацію і координати), а також дозволяють установити механізм контролю за неповноцінною розсадою або її відсутністю. Недоліком можна назвати ускладнення конструкції і збільшення вартості машини. У випадку зі скатними дошками важливою є також можливість транспортування рослин на її поверхні.

Револьверні розподільники помічені і в окремих машинах для садіння енергетичної верби довгими прутами. Для садіння горщикової розсади у касетах уже існують закордонні машини, в яких людина лише слідкує за своєчасним поповненням касет, а все інше відбувається автоматично. У них розсада виштовхується із касет спеціальними штовхачами, які наперед програ-

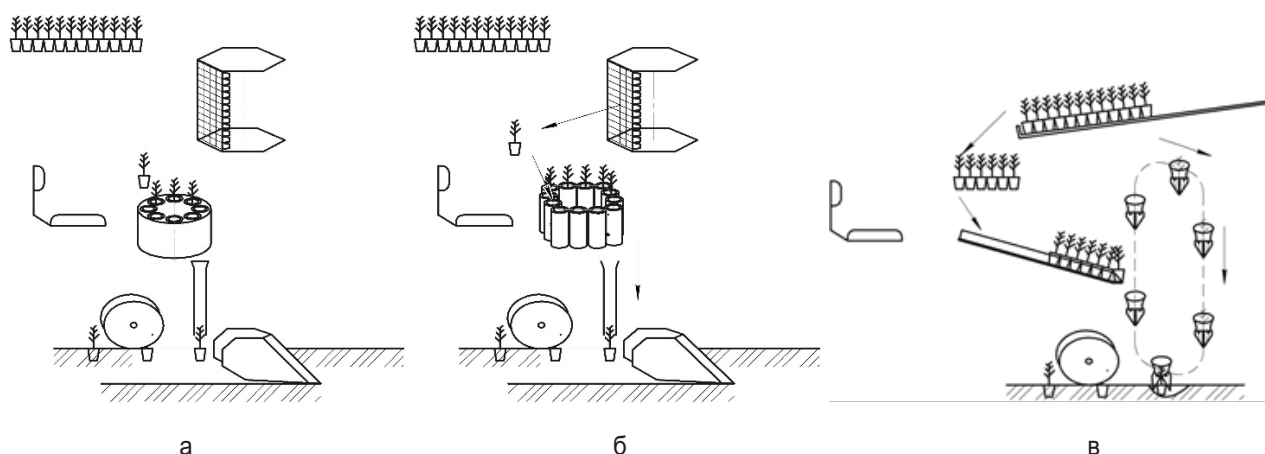


Рис. 4. Саджалки із розподільниками револьверного (а) і карусельного (б) типу та з автоматизованою подачею розсади скатними дошками (в)

муються на координатну сітку касет. Після звільнення із касет горщикова розсада спеціальними важільними пристроями змінює орієнтування на вертикальне, водночас опускається у розподільник накопичувач, який у такому положенні спрямовує розсаду до місця садіння.

Затрати праці на заряджання стрічок касетних автоматів, несумісність механізмів автоматизації для горщикової розсади із вимогами до садіння саджанців і живців вимагали пошуку конструкцій механізмів без касет. Головною проблемою в них став захват рослин із бункера. Існує багато ідей на рівні патентів, які по-різному вирішували це завдання, але реальна конструкція зустрічається у вигляді автомата без касети АБС-6 для саджанців (рис. 3в). Основними вузлами автомата є бункер для сіянів у вигляді циліндра обертання з округлим прорізом у днищі для проходження робочих елементів і механізм вибирання сіянів (Зума, 2006). Для роботи такого автомата садіння потрібно, щоб у бункері перед роботою було сформовано відносно упорядкований масив садивного матеріалу, тобто первісне формування поодинокого руху саджанців має здійснюватися вручну. Захвати, зберігаючи орієнтування, переносять їх у зону дії захватів садильного апарату.

Нині триває робота над удосконаленням процесу садіння рослин. Багато праць аналізують як теоретичні аспекти автоматизації (Bartenev, 2012; Miwa et al., 1991; Kasimov et al., 2015 та інші), так і автоматизацію конкретного виду рослин (Usenko, 2010; Asmolovskiy et al., 2004 та інші), навіть до впровадження робототехніки у процес садіння (Kutz et al., 1994; Mao et al., 2014 та інші). Проте кожен конкретний вид рослин потребує конкретного підходу. Зокрема, енергетична верба потребує врахування виду садивного матеріалу (живці довжиною 20–25 см).

Матеріали і методи досліджень. Через недостатній розвиток автоматизації садіння енергетичних деревних культур **метою роботи** є пошук перспективних шляхів і дієвих принципів забезпечення автоматизації процесів під час роботи саджалок.

Дослідження здійснювалося на основі структурно-факторного аналізу технічних рішень наявних автоматів садіння. Для виділення характерних ознак конкретних машин застосовувалися методи структуризації об'єкту та абстрагування від ознак, які не впливають на досліджуваний процес.

Результати. Нині науковці працюють над вирішенням проблеми садіння розсади, лісу, садів і виноградників у таких напрямках:

- забезпечення роботи саджалок на підвищених швидкостях;
- зниження затрат ручної праці для обслуговування садильних машин;
- покращення умов праці.

Вирішити ці завдання можна шляхом передачі функцій саджальників автоматичним системам виконання і регулювання технологічного процесу садіння. Донині накопичено певний досвід у розробленні та застосуванні автоматів подачі рослин у захвати садильного апарату. Засоби автоматизації умовно можна поділити на такі види:

- накопичувачі зі скатними дошками або розподільниками;
- автомати із гнучкими або жорсткими касетами;
- автомати без касет.

У всіх них є переваги і недоліки, але ці конструкції неможливо використати для садіння енергетичних деревних культур. Головним відмінним фактором є тип садивного матеріалу - енергетичні культури садять живцями довжиною 20-25 см і діаметром 8-20 мм, що суттєво відрізняється за своїми характеристиками від рослин із відкритою кореневою системою або від розсади у горщиках.

Основною перешкодою подальшого підвищення продуктивності саджалок є обмеженість можливостей людини у подачі живців – 40-60 шт./хв. (Bartenev, 2012), що відповідає швидкості поступального руху машини 0,8...2,1 км/год. У цих умовах важливо замінити працю оператора засобами автоматизації. Тому актуальним є пошук перспективних технологічних процесів і конструкцій робочих органів для автоматизованої подачі живців у машини для садіння енергетичних деревних культур, що структурно можна відобразити схемою (рис. 5).

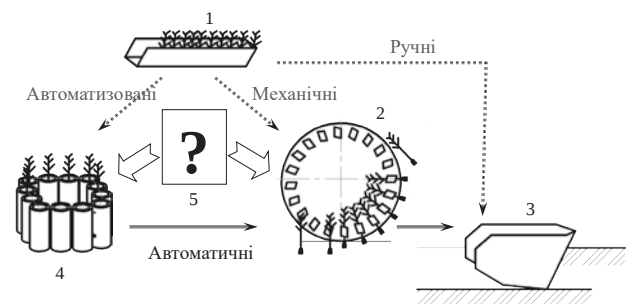


Рис. 5. Структурно-логічна схема виконання операцій процесу садіння живців енергетичної верби: 1 – місткість із розсадою; 2 – садильні апарати; 3 – сошники чи обладнання, що утворює борозни; 4 – накопичувачі садивного матеріалу; 5 – механізм подачі живців

У сучасних машинах для садіння енергетичної верби цей процес виконується винятково вручну (Yermakov, 2017, Hutsol, 2018).

Проаналізувавши різноманітні конструкції, ми дійшли висновку, що для підвищення продуктивності садильних машин слід удосконалити процес подачі живців від ємкостей до садильного апарату. Окрім того, потрібно використовувати проміжні накопичувачі живців, що дозволяють створити буфер, який компенсує невідповідність продуктивності садильного апарату і можливостей людини. Але це лише частково вирішує питання про підвищення продуктивності та зменшення частки ручної праці.

Створення механізмів для автоматизованої подачі живців до садильного апарату чи прямо до місця посадки є важливим науковим завданням на шляху збільшення продуктивності садильних машин.

Унаслідок аналізу літературних джерел та електронних ресурсів, досвіду окремих виробників садильної техніки нами синтезовано загальну структурно-логічну схему можливих варіантів виконання технологічного процесу подачі живців (рис. 6).



Рис. 6. Структурно-логічна схема можливих варіантів виконання технологічного процесу подачі живців

Обговорення. Корінним вирішенням проблеми садіння енергетичної верби на підвищених швидкостях і зниження затрат людської праці є передача функцій саджалників автоматичним системам виконання і регулювання технологічного процесу садіння (Asmolovskiy et al., 2004; Yermakov, 2017). Удосконалення конструкції окремих елементів машин і зміни у засобах, що утворюють борозни (наприклад введення у конструкцію сошника додаткових органів заорювання) і засобів, що заорюють ґрунт (використання пневматичних шин), дозволяють збільшити швидкість поступального руху до 6,5 км/год. Однак повністю реалізувати можливості процесу садіння можна лише за умови автоматизації подачі садивного матеріалу у захвати садильного апарату чи прямо у борозну. Для цього саджалки деревних енергетичних

культур мають бути оснащені механізмами автоматизованого відбору, орієнтування і транспортування живців до місця садіння. На нашу думку, найпростішим варіантом вирішення цієї проблеми є застосування завантажувального пристрою бункерно-магазинного типу із вільним висипанням завчасно орієнтованих живців із подальшим їх розділенням на порції. Унаслідок попередніх досліджень нами встановлено, що під час руху тіл у цьому бункері неодмінно виникають такі явища, як утворення склепів, перекоси у горизонтальній і вертикальній площинах, заклинювання тощо (Yermakov, Hutsol, 2018; Yermakov et al., 2019; Yermakov et al., 2019; Yermakov, 2019; Ivanyshyn et al., 2020; Yermakov, Hutsol, 2021). Ми пропонуємо для здійснення технологічного процесу виконати такі операції:

- забезпечити вільне висипання живців із бункера;
- забезпечити звуження потоку живців;
- створити поштучний потік;
- забезпечити забір живців із поодинокого потоку;
- забезпечити правильне орієнтування живців під час руху.

Висновки. Унаслідок аналізу конструкцій наявних засобів автоматизації садіння і способів здійснення процесу автоматизованої подачі садивного матеріалу виділено можливі шляхи організації різних способів у технологічний процес, що відображено у структурно-логічній схемі процесу. Виокремлено

перспективні шляхи автоматизації садіння живців енергетичних культур, для забезпечення яких потрібно враховувати, що:

- найбільшою проблемою під час створення автоматів садіння є автоматизація процесу подачі садивного матеріалу від накопичувальної ємності до місця садіння;
- для живців енергетичних культур найдоцільніше шукати рішення в автоматах без касет;
- під час вирішення питань ми стикаємось із такими проблемами, як склепоутворення, перекося тощо;
- виокремлення структури процесу дозволить системно підійти до пошуку рішення.

Бібліографічні посилання:

1. Aijun, G., Xiaoyu, L., Jialin, H., Zhilong, Z., Ji, Z., Jun, C. (2018). Design and experiment of automatic directing garlic planter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11):17-25. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.003>
2. Asmolovskiy, M.K., Loi, V.N., Zhukov, A.V. (2004). Mekhanizatsiya liesnogo i parkovogo hoziaystva (Mechanization of the forest, park and garden management). BSTU, Minsk. 450 p. (in Russian).
3. Baran, D., Kwaśniewski, D., Mudryk K. (2007). Wybrane właściwości fizyczne trzyletniej wierzby energetycznej. Inżynieria Rolnicza. V. 11. pp. 7-12.
4. Bartenev, I.M. (2012). Avtomatizatsiya processa posadki rasteniy (Automation of the planting process). Scientific journal of the KubSAU 75(01), pp. 384-396 (in Russian).
5. Bartenev, I.M. (2017). Innovatsionnye napravleniya tekhnicheskogo razvitiya lesnogo hoziaystva i zashchitnogo lesorazvedeniya (Innovative directions of technical development of forest management and protective forcession). Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. T.5. pp. 307-309 (in Russian).
6. Borys, M.M., Yermakov, S.V. (2017). Perspektyvy avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnykh kultur (Prospects for automation of planting cuttings of energy crops). Zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii. Kamianets-Podilskyi, 2017. pp. 23-26 (in Ukrainian).
7. Bush, C., Volk, T.A., Eisenbies H. (2015). Planting rates and delays during the establishment of willow biomass crops. Biomass and Bioenergy. V.83, 290-296 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.008>
8. Dziedzic, K., Łapczyńska-Kordon, B., Mudryk, K. (2017). Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix viminalis* L.). *Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation*. Vol. 1, No. 1, pp. 150-160.
9. Evseev, L. (1977) Rassadoposadochnaya mashina. Tekhnika molodezhi, 09
10. Frączek, J., Mudryk, K. (2005). Jakości sadzonek wierzby energetycznej w aspekcie sadzenia mechanicznego. Inżynieria Rolnicza, 6 (66), 159-167.
11. Galle, D.T. (2012). Development of an automated precision planter for establishment of *Miscanthus giganteus*. Purdue University. ProQuest Dissertations Publishing, 2012. 10156261.
12. Hutsol T., Glowacki S., Mudryk K. Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics). Monograph. Warsaw: 2021. 136 p.
13. Hutsol, T., Yermakov, S., Firman, Ju, Duganets, V., Bodnar, A. (2018). Analysis of technical solutions of planting machines, which can be used in planting energy willow Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. pp. 99-111. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_10.
14. Ivanyshyn, V., Yermakov, S., Ishchenko, T., Mudryk, K., Hutsol, T. (2020). Calculation algorithm for the dynamic coefficient of vibroviscosity and other properties of energy willow cuttings movement in terms of their unloading from the tanker. E3S Web of Conferences, 154, 04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015404005>.
15. Kasimov, N.G., Konstantinov, V.I., Kutaviin, A.S. (2015). Klassifikatsiya rassadoposadochnykh mashyn po osnovnym pry'znakam funktsy'ony'rovany'ya. [Classification of seedlings planters according to the main operating principles]. *Vestnik of the Izhevsk State Agricultural Academy*, 3 (44), pp. 20-25. (in Russian)
16. Kravchuk, V., Novokhatskyi, M., Kozhushko, M., Dumych, V., Zhurba, H. (2013). Na shliakhu do stvorennia plantatsii enerhetychnykh kultur (On the way to creating energy plantations). *Tekhnika i tekhnolohii APK*, № 2 (41) (in Ukrainian).
17. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2019). Economic aspects of biomass market development in Ukraine. Renewable Energy Sources engineering, technology, innovation. Krynica. pp. 12-14. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015401007>.
18. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2017). The development of the market of the renewable energy in Ukraine. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer International Publishing AG. pp. 71-81. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_8.
19. Kutz, L.J., Craven, J.B. (1994). Evaluation of photoelectric sensors for robotic transplantation. *Applied Engineering in Agriculture*, 10 (1), pp.115-121.
20. Liu, K., Cheng G. and Kong, Z. (2019). Beidou agricultural machinery automatic driving software design, 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), pp. 1770-1775, <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997712>
21. Lys, S.S. (2009). Ohliad tekhnolohii hazyfikatsii derevyny (Review of wood gasification technology). *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy: zb. nauk.-tekhn. prats*. Lviv (in Ukrainian)

22. Manual seedling planter PPM-1. Technical details and operations manual Retrieved: <http://www.rosta.ua/pics/passport/rrm1.rar>, Access: 20.10.2021.
23. Mao, H., Han, L., Hu, J., Kumi, F. (2014). Development of a pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedlings. *Applied engineering in agriculture*, 30(4), pp. 547-556.
24. Mitkov, V., Kiurchev, S., Nurek, T., Chorna, T., Ihnatiev, Ye. (2021). Scientific bases of aggregation of combined units on the basis of an integrated tractor. Monograph. Warsaw.
25. Miwa, Y. (1991). Automation of plant tissue culture process. In *Automation in biotechnology: a collection of contributions presented at the Fourth Toyota Conference, Aichi, Japan, Amsterdam: Elsevier*.
26. Mudryk K, Hutsol T., Ovcharuk O. (2021). Określenie rozłożenia pędów wierzby energetycznej. Trends and challenges of modern agricultural science: theory and practice, Kyiv, pp. 20-22.
27. Roik, M.V., Sinchenko, V.M., Fuchylo, Y.D. (2015). Energetychna verba: texnologiya vy'roshhuvannya ta vy'kory'stannya (Energy willow: cultivation technology and usage). LLC "Nilan-LTD", Vinnitsa, p.340 (in Ukrainian).
28. SALIX energy. Retrieved: <https://www.salix-energy.com>. Access: 20.10.2021.
29. Seedling planters. Retrieved: http://www.agro-sistema.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=76 Access: 20.10.2021.
30. Sinchenko, V., Fuchylo, Ya., Humentyk, M. (2015). Koryhuvannya dla verby (Adjustments for willow). The Ukrainian Farmer (in Ukrainian).
31. Usenko, M.V. (2010). Kompleks malogabarytnykh mashyn dlya vyroshchuvannya odnorichnykh kultur na peresichnyi miscevoli (The small-size machine complex for growing non-perennial crops in rough terrain). Monograph. RVV LNU, Lutsk, p. 240 (in Russian).
32. Willowpedia. Retrieved: <https://www.youtube.com/user/Willowpedia>. Access: 20.10.2021.
33. Wimatec Mattes GMBH. Retrieved: <http://www.wimatec-mattes.de>. Access: 20.10.2021.
34. Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Knapczyk, A. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 23-25 May 2018, pp. 1933-1938.
35. Yermakov, S. (2017) Kierunki optyimizacji maszyn dla sadzenia wierzby energetycznej. Skróty referatów i posterów Konferencji Naukowej pt. Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej. Warszawa, 8-9 czerwieca 2017, p. 75-77.
36. Yermakov, S.V. (2017). Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. *Podilskyi visnyk: silske gospodarstvo, tekhnika, ekonomika*, v. 2, pp. 37-45.
37. Yermakov, S., Hutsol, T., Ovcharuk, O., Kolosiuk, I. (2019). Mathematic simulation of cutting unloading from the bunker. *Independent journal of management & production* v.10, n.7, Special Edition PDATU, 758-777. <https://doi.org/10.14807/IJMP.V10I7.909>.
38. Yermakov, S., Hutsol, T., Mudryk, K., Dziedzic, K., Mykhailova, L. (2019). The analysis of stochastic processes in unloading the energy willow cuttings from the hopper. *Environment, Technology, Resources*. Rezekne; Latvia; 249-252. <https://doi.org/10.17770/etr2019vol3.4159>.
39. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2018). Features of the heterogeneous rood-like materials outflow (by example of energy willow cutting). *Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research*, p. 55-68.
40. Yermakov, S., Hutsol, T., Slobodian, S., Komarnitskyi, S., Tysh, M. (2018). Possibility of using automation tools for planting of the energy willow cuttings. *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation*. pp. 419-429. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_42
41. Yermakov, S., Tulej, M., Tulej, W., Shevchuk, I. (2018). Analiz konstruktsiy avtomativ sadinnia (Construction analysis means of planting automation). *Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii*. Vypusk 34, Pereiaslav-Khmelnitskyi, pp.615-619 (in Ukrainian).
42. Yermakov, S. (2019). Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (*Salix Viminalis*). *Teka. Quarterly journal of agri-food industry*, v. 2, p. 71-78.
43. Yermakov, S., Boris, N. (2016). Sopostavlenie reshenij lesoposadochnykh mashin s trebovaniyami dlya energeticheskikh drevesnykh kul'tur (iva, topol') (Comparison of planting machine solutions with requirements for energy tree crops (willow, poplar)). *Sovremennyy nauchnyy vestnik*. № 20-1 (267). Belgorod: Rusnauchkniga. pp. 67-68 (in Russian).
44. Yermakov, S.V., Borys, M.M. (2015). Analiz efektyvnosti ahrehativ dla sadinnia enerhetychnoi verby (Efficiency analysis of the energy willow planting devices). *Veda a vznik - 2015. Dil 14 Ekologie Zemepis a geologie Vystavba a architektura Zemedelstvi*, Praha, pp. 47-49 (in Ukrainian).
45. Yermakov, S., Hutsol, T., Mudryk, K. (2018). Vykorystannia verby v enerhetychnykh i hospodarskykh tsiliakh (Using willow for energy and economic purposes). *Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii*, Pereiaslav-Khmelnitskyi, s.732-735 (in Ukrainian).
46. Yermakov, S., Hutsol, T., Mudryk, K. (2019). Peredumovy vyroshchuvannya enerhetychnoi verby v Ukraini (Prerequisites for growing energy willow in Ukraine). *Enerhoefektyvnist: nauka, tekhnolohii, zastosuvannya*. Kyiv, s.16-18 (in Ukrainian).
47. Yermakov S.V., Hutsol T.D. (2021). Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in the conditions of static and dynamic arches. *Engineering of nature management*, vip.3, s. 97-109.
48. Zyma, I.M., Maliutin, T.T. (2006). Mekhanizatsiia lisohospodarskykh robit (Mechanization of forestry works). Kyiv: INKOS, 488 p. (in Ukrainian).

Yermakov S. V., Head of the DAK GPS Training and Research Laboratory, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsk region, Ukraine

Hutsol T. D., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Polissia National University, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsk region, Ukraine

Potapskyj P. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsk region, Ukraine

Garasymchuk I. D., State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsk region, Ukraine

Structuring the process of automation of planting plants of energy willow

Biomass energy is one of the most promising branches of renewable energy, primarily due to the possibility of rapidly increasing the production of raw materials. The creation of new plantations of energy crops requires appropriate technical means. And for energy willow or poplar, you should also take into account the features of planting material, which are woody cuttings 20-25 cm long and 6-16 mm in diameter. Known machines for planting cuttings of energy crops are characterized by low productivity due to the limitation of the speed of manual laying of cuttings in the planter. Therefore, the creation of mechanisms for automated planting of cuttings in planting machines is an urgent scientific and industrial task.

The study is based on the analysis of known designs of planting machines used in planting seedlings and seedlings for the forest. The analysis used the methods of structural-factor analysis of the structure of mechanisms, and highlighted the features of the work processes that occur at each stage of the overall technological process of moving cuttings from the technological tank to the planting site.

After analyzing the known technical solutions for planting forests, seedlings, potted materials and directly cuttings of energy crops, it was noted that the most problematic is the position responsible for feeding cuttings from containers with seedlings to the place of planting. In modern machines for planting energy willow, this process is performed exclusively by hand. Information-logical searches led to the synthesis of the structural-logical scheme of the technological process of automated planting. According to this scheme, it is seen that the main operations that must be implemented in the planting machine are the narrowing of the flow of cuttings, piece selection, orientation and transportation of planting material to the planting site. Promising ways to automate the planting of cuttings of energy crops and possible problems on the way to their implementation are identified.

Key words: automatic planting machine, planter, feeding mechanism, cassette mechanism, planting machine, energy willow.

Дата надходження 27.08.2021 р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ SMART FIRMER ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

Зубко Владислав Миколайович

доктор технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2426-2772
vladislavzubko@ukr.net

Хворост Тетяна В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-8863-8126
khvorost.t83@gmail.com

Литвиненко Єгор Євгенійович

спеціаліст
Bueling
ORCID: 0000-0001-2312-7227
poissonapalm@gmail.com

Серед великого різноманіття культур, що вирощуються на полях нині, значне місце посідає кукурудза. Поширення цієї культури зумовлене заявленою на неї кількістю готової сільськогосподарської продукції та ціною. Тому нині кукурудза є однією із передових сільськогосподарських культур, які вирощують у різних країнах і на континентах.

Одним із головних завдань процесу вирощування культур у сільському господарстві є якісний посів.

Нині все більш поширеними стають технології, які використовують усілякі датчики для контролю проведення сівби та посіву агрокультур.

У статті досліджено ефективність використання системи Smart Firmer від компанії Precision Planting, який допомагає під час сівби визначити вологість ґрунту, температуру, чистоту борозни та її однорідність.

Отже, досліджуючи проведення сівби кукурудзи на полях, головним фактором має виступати якість проведення сівби, що забезпечує потребу обраного гібриду або сорту агрокультури відповідно до умов вирощування.

В умовах інтенсивної зміни ґрунтово-кліматичних умов актуальним науковим і прикладним завданням є створення оптимальних умов для росту і розвитку агрокультур. Питання про моніторинг середовища, в якому висіватиметься насіння, є важливим аспектом агрономічного до проведення сівби агрокультур.

Нині слід зупинитися на визначенні і контролі вологи посівного шару, його температурі, наявності рослинних решток і визначенні типу ґрунту, на якому сіятиметься агрокультура.

Зафіксована температура в орному шарі ґрунту є критерієм проведення сівби, адже за температури нижче 10°C проводити посів не рекомендовано. Це пов'язано із втратою схожості насінини і подальшим загиванням посівного матеріалу.

Вологість ґрунту є показником, за яким регулюється глибина посіву агрокультури. Цей фактор ураховують із метою отримання рівномірних сходів культури, незважаючи на рельєф поля, зміну конфігурації (приєднання до великого масиву полів дрібних фермерських із іншими попередниками та іншими типами обробітку).

Для цього потрібно врахувати наявну кількість рослинних решток агрокультури після попередників і тип ґрунту.

Ключові слова: сівба кукурудзи, вологість ґрунту, температура ґрунту, рослинні рештки, тип ґрунту.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.3>

Постановка проблеми у загальному вигляді

Агровиробництво в Україні є однією із провідних галузей. Окрім стабільності у забезпеченні населення доступним та якісним продовольством, наше сільське господарство спроможне зробити вагомий внесок у вирішення проблеми світового голоду. Потенціал України у виробництві значно перевищує потреби на внутрішньому ринку.

Сільськогосподарські території становлять 42 млн. гектарів, або 70% від загального земельного фонду України: 78,9 % сільськогосподарських угідь є орними землями і багаторічними насадженнями; 13,0 % – пасовищами; 8,4 % – сіножатями.

Станом на 2021 рік українські виробники агропродукції постачають товар майже у 190 країн світу (Pavlenko, 2015).

Протягом останнього часу на території України спостерігається стрімке зростання посівних площ під такі культури, як кукурудза, соняшник, соя, рапс. На це впливає сприятливий клімат для вирощування зазначених агрокультур і ціноутворення, яке нині можна прослідкувати на ринку агропродукції (Kernasyk, 2019).

Кукурудза нині має значну перевагу, тому неможливо переоцінити її важливість як для фермерського господарства, так і для підприємства. Це стосується і для нашої країни загалом, адже наша економіка невід'ємно залежить від аграрного сектору. Кожен аграрій прагне досягти

високої врожайності, із більшою ефективністю використати свої ресурси і можливості для досягнення цієї мети.

Посів кукурудзи має таке ж велике значення, як і збирання, тому важливо дотримуватись усіх необхідних правил і норм (Baranov, 2021).

Головними вимогами до посіву кукурудзи із максимальною ефективністю та подальшого збирання врожаю є (Baranov, 2021):

- терміни посіву;
- глибина посіву;
- норми посіву;
- добрива тощо.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Розвиток сільського господарства неможливий без використання сучасної техніки. Працівники аграрного сектору розуміють, що збільшення рентабельності їхніх господарств прямо залежить від внесків, тому треба переходити на більш ефективні та ресурсозберігаючі технології обробітку. Сівалки точного висіву для просапних культур і посівні комплекси дозволяють раціонально використовувати посівний матеріал і добрива, економити на паливно-мастильних матеріалах і робочій силі, тим самим підвищуючи якість і врожайність продукції (Bilinska, 2015, Podolyan, 2021).

Механічні сівалки відрізняються простою конструкцією і відносно невисокою ціною, але вони мають суттєвий недолік: через забивання дозуючого диску висів може бути неточним. Проте пневматичні сівалки (які є значно дорожчими) мають більш стабільну точність висіву і також можуть висівати двійники. Нині фермери мають можливість використовувати сівалки з електричним приводом, які мають більший строк служби і найкращі показники висіву, можливість регулювання норми висіву із кабіни та є набагато простішими в обслуговуванні (Smolinskiy, S.).

Для якісного проведення посівної слід якісно до неї підготуватися: поле треба вирівняти, провести обробіток ґрунту, позбавитися бур'янів, обрати якісний посівний матеріал (Viniukov, O. et al., 2020). Та нині, крім цих базових факторів, якими керуються українські агрономи, із Америки прийшли нові рішення, більш націлені на методи точного землеробства: під час посіву особлива увага приділяється контролю за дотриманням норм висіву, розміщенню насінини, ширині міжрядь та інтервалу між рослинами, відсутності двійників, пересівів і пропусків.

Якість сівби забезпечує дружну схожість рослин, кращу густоту стояння і необхідну площу їх живлення. Така сівба можлива за застосування сівалок точного висіву, які є досить дорогими. Аграрію потрібно переконатися в доцільності фінансових інвестицій. Для цього проводяться дослідження, в яких розробники рішень підтверджують їхню ефективність.

Глибина розташування насіння.

Проростання насінини прямо залежить від стану ґрунту, його щільності, вологості і глибини, на якій розташована насінини. Важливим значенням для врожайності у майбутньому є добра схожість насіння, що залежить від сівалки та від того, чи може вона витримувати необхідне навантаження.

Відстань між рослинами.

У цих сівалках приділяється велика увага ефективності розділення насіння, а також тому, з якої траєкторії насінини виходить, та вільному проходженню насіння непроводом задля того, щоб траєкторія руху і доставка посівного матеріалу із бункера у ґрунт були однаковими.

Залежно від кліматичних умов і забезпеченості вологою регіону для різних сортів обирають різні норми висіву для забезпечення площі живлення рослини, необхідної для її розвитку. Крім того, має значення, в якому стані знаходяться ґрунти, та їхня якість: кількість гумусу, структура, забезпеченість мікроелементами.

Особливості рельєфу поля і корисні елементи живлення можуть розташовуватися нерівномірно, що впливає на рівномірність висіву. Найкращу врожайність із такого поля можна отримати лише у разі застосування диференційованого висіву, який виконується згідно із картою-завданням.

Окрім того, що норма висіву є одним із найважливіших показників, який впливає на врожайність, необхідне ґрунтове перевищення норми висіву призводить до значних перевитрат посівного матеріалу і значно збільшує витрати на посівну кампанію.

Висівати зерно кукурудзи рекомендовано пунктиром, коли глибина міжряддя становить 70 сантиметрів. Важливо уникати загущення, оскільки пригнічується розвиток качана, значно підвищуються витрати вологи із ґрунту, посилюється конкуренція рослин за світло. Внаслідок цього формуються насінини значно меншого розміру, ніж зазвичай, а також термін збирання урожаю зміщується. Рослини ранньостиглих гібридів мають менші розміри, за цією причиною сіяти їх можна густіше. Крім густоти стояння рослин, слід звертати увагу на їхнє рівномірне розміщення. Для досягнення оптимального стояння рослин можна зменшити ширину міжряддя, але таке зменшення негативно впливає на формування зернини у качані (Bogner, 2021).

Precision Planting Smart Firmer (рис. 1) – сенсор, який визначає вміст органічної речовини у ґрунті під час посіву та автоматично змінює норму у режимі on-the-go. Додатково в тому ж самому режимі визначається рівень вологості та залишків під сошником, на основі чого формується карта із високою роздільною здатністю, що дозволяє відразу коригувати глибину висіву.

Завдяки Smart Firmer диференційований посів стає ще доступнішим, оскільки не потрібно окремо досліджувати поле і створювати карту завдань.



Рис. 1. Датчик Smart Firmer у польових умовах

Методика досліджень та обговорення результатів

Основна мета – дослідження впливу появи дружних сходів кукурудзи на врожайність. Для контролю дати появи сходів використовувався "метод прапорців" (рис. 2). Коли рослина починала з'являтися над поверхнею землі, біля неї встановлювали прапорець. Для позначення періоду сходів рослин використовували прапорці чотирьох різних кольорів.



Рис. 2. Контроль дати появи сходів із використанням "методу прапорців"

На рис. 2 представлена нерівномірність сходів рослин, що позначено різнокольоровими прапорцями.

Вимірювання температури ґрунту

Дослідження, які проводили задля аналізу залежності інтенсивності сходів рослин від температури ґрунту показали, що температура має істотний вплив на появу сходів (рис. 3).

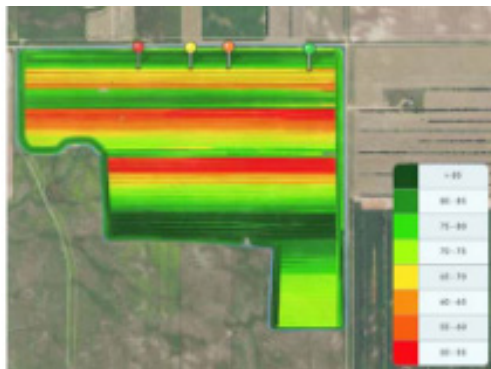


Рис. 3. Карта із визначеними ділянками поля за різних температур ґрунту

Достатня температура ґрунту є критичним компонентом для швидкої схожості насіння. Наприклад, тривалість проростання насіння кукурудзи різко зростає, якщо температура опуститься нижче 10°C. Smart Firmer дає змогу встановити температуру ґрунту у посівній борозні від ряду до ряду, гарантуючи, що здійснюється посів у сприятливих умовах.

Однорідність борозни

Дослідження, які проводили для аналізу залежності інтенсивності сходів рослин від однорідності ґрунту, показали, що цей показник істотно впливає на появу сходів (рис. 4).



Рис. 4. Карта із визначеними ділянками посіву за різної однорідності ґрунту

Для однорідного проростання насіння та якісного зростання рослин потрібне однорідне середовище. Smart Firmer ідентифікує будь-які нерівності вздовж борозни, такі як грудки ґрунту, повітряний режим або вологість ґрунту, тому ви можете отримати уявлення про те, як правильно відрегулювати продуктивність секції сіялки і вирішити проблеми, які вплинуть на врожайність.

Визначення частки пожнивних решток

Дослідження показують, що частка пожнивних решток на поверхні поля є нерівномірною, оскільки наявний різний рівень урожайності та якість виконання попередніх механізованих технологічних операцій. На рис. 5 представлена схема розподілення решток на посівному ложі.

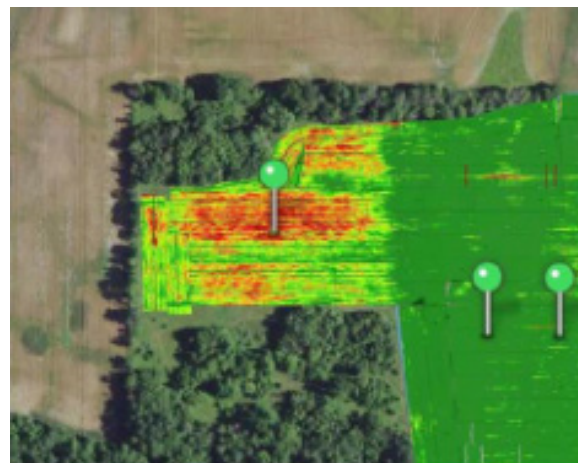


Рис. 5. Рівень розподілення рослинних решток у посівному ложі

Наявність пожнивних залишків у борозенці має добре відомі негативні наслідки для проростання насіння. Smart Firmer дозволяє вимірювати кількість залишків у борозенці і, відповідно, регулювати очисники рядів; це гарантує, що залишки не обмежуватимуть поглинання вологи насінням або їх заражати.

Визначення вмісту органіки

На рис. 6 представлена карта рівномірності розподілення органіки в межах одного поля.

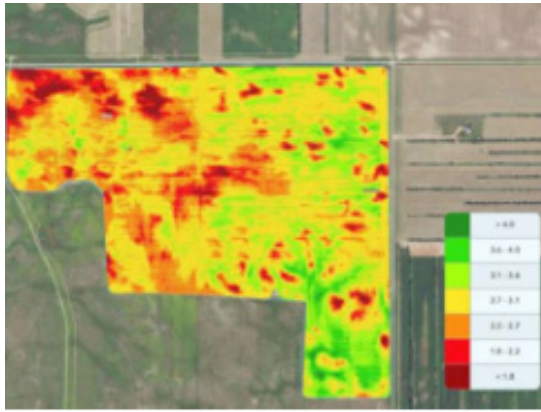


Рис. 6. Карта розподілення органіки в межах одного поля

На будь-якому полі врожайність залежить від чинників, які визначаються типом ґрунту, органічною речовиною, топографією, дренажем і безліччю інших чинників. Для кращого управління цими інструментами регулювання врожайності карта органічних речовин Smart Firmer високої чіткості є ключовим фактором для прийняття точних рішень під час вибору норм висіву, підбору гібридного насіння і програм із внесення добрив.

Висновки:

Проведеними дослідженнями встановлено, що тепло і вологість ґрунту – найважливіші чинники, на які слід зважати під час сівби задля досягнення швидкого і дружного проростання. Датчик Smart Firmer вимірює температуру ґрунту у режимі реального часу. Фермер має можливість прийняти ефективне рішення щодо проведення посіву. Вміст вологи у ґрунтах різного типу може різнитись, але Smart Firmer фіксує і показує цю різницю, що дає змогу одразу трохи збільшити глибину посіву, щоб насіння потрапило у зону із достатньою вологістю. Механічна несправність висівної секції, наприклад погано закріплене опорне колесо, може призвести до закидання борозни сухим ґрунтом. Smart Firmer показує цей дефект під час сівби, і фермер може знайти та усунути несправності.

Унаслідок висихання ґрунту і зниження вмісту вологи у борозні глибину висіву доводиться збільшувати для того, щоб насіння надходило у досить вологий шар ґрунту. Навпаки, надто глибокий посів у борозну із достатньою кількістю вологи у ґрунті певних типів та агрегатної структури може призводити до затримування сходів.

Дослідження показують, що вологість ґрунту 30% є достатньою для набухання і проростання насіння більшості гібридів кукурудзи. Якщо вологість нижче 30%, збільшують глибину посіву для того, щоб насіння потрапляло у вологіший ґрунт. Якщо вологість у борозні перевищує 30%, глибину посіву збільшувати не потрібно; фактично така вологість може перешкоджати появі сходів. Для того, щоб повністю зрозуміти зв'язок між умістом вологи у борозні та глибиною посіву, потрібно здійснити додаткові дослідження.

Дослідження впливу якості посіву на врожайність кукурудзи, проведені у 2020-2021 роках в Україні

(Сумська область), показали, що рослини, які відставали від інших рослин у розвитку на один листовий комірець (вузол), у підсумку давали лише половину качана. Ті ж самі рослини, які відставали на два листових комірці, могли взагалі не дати врожаю.

Дослідження розташування насіння у ряду показали, що головний фактор впливу на точність розміщення – швидкість трактора. Якщо під час роботи на високій швидкості на висівні секції сівалки не забезпечувався оптимальний тиск, вони підскакують, а насіння рикошетить від стінок зернової трубки, що призводить до неточного розміщення насіння і порушення оптимальної відстані між рослинами. Додатковий імпульс сівалки може спричинити відбивання насіння від борозни, галопування і зайвий самостійний рух.

Нерівномірне розташування посівного матеріалу у борозні за однакових умов призводить до нерівномірності сходів. Для обчислення потенційних утрат врожаю внаслідок пізніх сходів качани перевіряли вручну. На рис.7 представлений розмір качанів рослин, які зійшли першими (протягом наступних 18 годин), а на рис. 8 – рослин, які зійшли через 42 години і більше після перших. Після визначення маси качанів під час збирання врожаю проведено розрахунки щодо затримки появи сходів. За важких погодних умов рослини, сходи яких з'являються найпізніше, можуть втратити до 50% врожайності. Рослини, масові сходи яких з'являються через 18-28 годин після появи перших сходів, зазнають утрат на рівні 20%, а через 29-42 години – 25% (рис. 7).



Рис 7. Розмір качанів у рослин, сходи яких з'явилися першими у наступні 18 годин



Рис. 8. Розмір качанів рослин, сходи яких з'явилися через 42 години і більше після перших

Проведеними дослідженнями встановлений вплив схожості зерна на врожайність посівів (рис. 9).

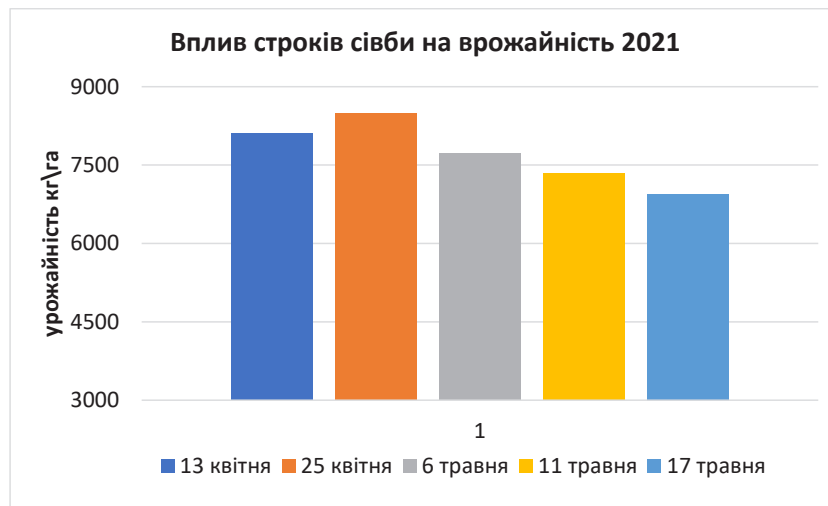


Рис. 9. Вплив строків сівби на врожайність

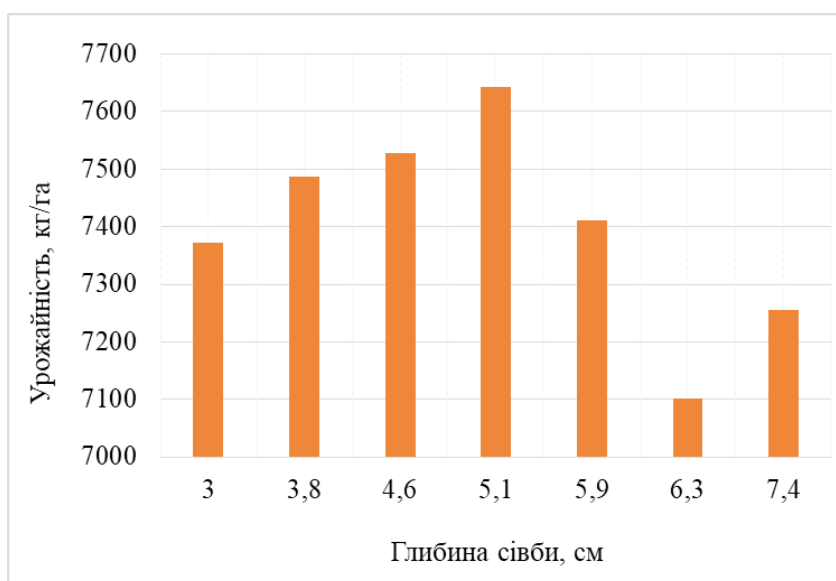


Рис. 10. Графік оптимальної глибини під час сівби

За даними рис. 9, найкращим періодом сівби кукурудзи був тиждень від 25-го квітня: кукурудза, посіяна того тижня, досягла найвищої врожайності. У межах цього дослідження врожайність становила 8492 кг/га (рис. 9).

Більш рання сівба (у тиждень від 13-го квітня) призвела до втрат урожайності приблизно на 400 кг/га через нижчу температуру і вищу вологість насіннєвого ложа.

Висів після оптимальної дати (25 квітня) призвів до зменшення врожайності на 710 кг/га.

Кукурудза, посіяна 17-го травня, дала найнижчу врожайність, її зниження перевищило 1544 кг/га.

Вологість ґрунту є важливим чинником проростання насіння і появи дружних сходів, досягнення максимальної

врожайності. Датчики Smart Firmer надають нам показники вологості у кожній борозні, що дозволяє вибрати правильну глибину у разі зміни ґрунтових умов (рис. 10).

На основі проведених польових досліджень, результати яких представлено на рис. 10, доведено, що середня глибина посіву насіння становила 5 сантиметрів. Зменшення глибини висіву призводило до зменшення врожайності на 300-600 кг/га. Аналогічно, збільшення глибини висіву призводило до зменшення врожайності на 532-958 кг/га. У середньому економічні втрати становили \$50-100/га. Отже, ці показники підкреслюють важливість глибини посіву, показуючи, наскільки сильно відхилення від оптимальної глибини впливає на втрату врожайності та економічні втрати.

Бібліографічні посилання:

1. Pavlenko, A. (2015). Rekordniy eksport i rossiyskoe embargo: kakim zapomnili agrarii 2015 god [Record export and Russian embargo: how farmers remember 2015]. Kiev: Economic truth (in Russian). URL: <https://pravda.com.ua/rus/columns/2015/12/30/574660/> (reference date 01.09.2021).

2. Kernasyk, Y. (2019). Oliini kultury: tendentsii na rynku [Oilseeds: market trends]. Kiev: Agribusiness Today (in Ukrainian). URL: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichni-hektar/item/15275-oliini-kultury-tendentsii-na-rynku.html> (reference date 01.09.2021).
3. Baranov, D. (2021). Sivba kukurudzy: korysna informatsiia pro chas sivby, normu vysivu ta obrobitok igruntu [Sowing corn: useful information about sowing time, seeding rate and tillage]. KWS (in Ukrainian). URL: <https://kws.com.ua/uk/agroservis/sivba/sivba-kukurudzy/> (reference date 01.09.2021).
4. Bilinska, V. (2015). Suchasni innovatsiini tekhnolohii v silskomu hospodarstvi: osnovna kharakterystyka ta perspektivy vprovadzhennia [Modern innovative technologies in agriculture: main characteristics and prospects of implementation]. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Economics. Vol. 7 (172) p. 74-80 (in Ukrainian).
5. Podolyan, A. (2021). Resheniya Precision Planting dlya poseva [Precision Planting solutions for seeding]. Kiev: Amaco (in Russian). URL: <https://amaco-int.com.ua/selhoztehnika/precision-seeding/> (reference date 01.09.2021).
6. Smolynskiy, S., Smolynska, A., Marchenko, V. (2017). Mekhanichni chy pnevmatichni sivalky – yaki lipshi? [Mechanical or pneumatic drills - which is better?]. Kiev: Agroexpert. URL: <https://agroexpert.ua/mechanichni-ci-pnevmatichni-sivalki-aki-lipshi/> (reference date 01.09.2021).
7. Viniukov, O.O., Chuhrii, H.A., Bondareva, O.B. (2020). Naukovo-praktychni rekomendatsii po provedenniu kompleksu vesniano-polovoykh robot v donetskii oblasti [Scientific and practical recommendations for a set of spring field works in the Donetsk region]. Donetsk: Donetsk State Agricultural Research Station National Academy of Agrarian Sciences. 61 p. (in Ukrainian).
8. Bogner, B. (2021). Brendan enhanced his ExactEmerge with FurrowForce and vApply. URL: <https://www.precisionplanting.com/products/testimonial/enhancing-a-new-planter-for-improved-emergence> (reference date 01.09.2021).

Zubko V. M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University Sumy, Ukraine

Khvorost T. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University Sumy, Ukraine

Litvinenko Y. Y., Specialist, Bueling, Kyiv, Ukraine

Research of efficiency of using the SmartFirmer system in growing corn on grain

Among the great variety of crops grown in the fields today, corn occupies a significant place. The spread of this crop is due to the declared quantities, both finished agricultural products and price. Therefore, today corn is becoming one of the leading crops grown in different countries and continents.

One of the main tasks of the process of growing crops in agriculture is quality sowing.

Today, technologies that use all sorts of sensors to monitor the sowing and sowing of crops are becoming more common.

The article examines the effectiveness of the SmartFirmer system from Precision Planting, which helps to determine soil moisture, temperature, furrow purity and homogeneity.

Thus, when researching the sowing of corn in the fields, the main factors should be the quality of sowing – meeting the needs of the selected hybrid or variety of agriculture in accordance with the conditions of cultivation.

In the conditions of intensive changes of soil and climatic conditions the actual science and applied tasks are creation of optimum conditions for growth and development of agricultural cultures. The issue of monitoring the environment where seeds will be sown is an important aspect of agricultural requirements for sowing crops.

Today we should focus on determining and controlling the moisture of the seed layer, its temperature, the presence of plant residues and determining the type of soil where sowing is carried out.

The fixed soil temperature in the seed layer is a criterion for sowing. After all, at temperatures below 10°C sowing is not recommended. This is due to the underdevelopment of the seed and the subsequent rot of the seed.

Soil moisture is an indicator that regulates the depth of sowing. This is in order to obtain uniform crop seedlings regardless of the terrain, changes in configurations (joining a large array of small farm fields with other predecessors and other types of cultivation).

To do this, it is necessary to take into account the available amount of crop residues after predecessors and soil type.

Key words: corn sowing, soil moisture, soil temperature, plant residues, soil type.

Дата надходження 23.08.2021 р.

**FORMALIZATION OF KINEMATIC STRUCTURES SYNTHESIS OF PRODUCTS DISASSEMBLY
MECHATRONIC SYSTEMS AT THE COMPLEX EQUIPMENT REPAIR STAGE**

Konoplianchenko Yevgen Vladislavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4814-1796
yevhen.konoplianchenko@snau.edu.ua

Chibiryak Yana Ivanivna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-0634-7609
y.chibiryak@cs.sumdu.edu.ua

Song Zhaoyang

PhD Student
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-7650-936X
Song_Zhaoyang@i.ua

Chernenko Pavlo Volodymyrovych

Senior Lecturer
National Academy of National Guard of Ukraine
ORCID: 0000-0003-0351-3111
Pav.chernenko@ukr.net

Ryasna Olga Vasylivna

Senior Lecturer
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-6917-6950
Olga5062017@gmail.com

This work is devoted to the process of formalizing the search for a rational version of the layout solution for mechatronic disassembly systems. Based on the developed models for disassembling products and the kinematics of industrial robots, it became possible to select a robot with an appropriate degree of mobility in an automated mode. The next step in the selection of industrial robots is to analyze the feasibility of the task, taking into account the accuracy, weight and dimensions of the disassembled elements. For disassembling products, those robots are selected whose technical characteristics allow disassembly taking into account the characteristics in question. The robots are ranked based on their value. Robots with the lowest cost have the first rank. If the robot in question does not meet the selection criteria or the structure of the production site does not coincide with the structure of the disassembly technological scheme, then a robot with a large rank is selected and the analysis of production manufacturability is performed again.

From the point of view of disassembly technology, a product is a set of types of connections of its parts. The process of transformation of the type of connection during operation is influenced by a number of factors: – operation time; – operating conditions; – the degree of residual impact on the environment.

The developed technological models of geometric and kinematic movements of products and executive bodies of robots adequately describe the location of the disassembled parts in space and their movements during disassembly. The classification of industrial robots on the basis of their structural and kinematic characteristics makes it possible to select them, taking into account the necessary kinematics and accuracy when disassembling joints, the robot's carrying capacity and the ability to work with objects of certain dimensions. The main idea of the concept presented in the work is to develop a methodology for a systematic approach to the design of highly efficient technological systems used in the reconstruction, modernization and restoration of the operability of technical means and objects of material production in mechanical engineering.

Key words: *technological system, simulation, structural synthesizing, mechatronic systems, selective disassembly, kinematic movements, robots, optimization.*

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.4>

Introduction

Analysis of modern technologies for the repair of equipment shows a significant difference in the level of technological equipment and technologies that are used in industrial and repair enterprises. At the stage of repair, the complexity of solving problems is high due to the fact that the path to the place of the defect is original. This is one of the restrictions on the introduction of mechatronic systems into repair production. Therefore, the automation of the process of disassembling critical products is an urgent task.

Formulation of the problem

Among the whole variety of types of technological equipment, such systems can be distinguished into a separate group, which are subject to increased requirements for the safety of operation, maintenance and repair as a result of the specific features of their design and functional purpose. Examples of such equipment are high-power gas turbine engines, special equipment, nuclear power engines, including special-purpose vehicles, etc.

At the stage of reengineering of such products, that is, restoration of their performance, repair and modernization, it becomes necessary to disassemble the failed part (Konoplianchenko et al., 2017, c. 27; Konoplianchenko et al., 2017, c. 21). It is known that complete disassembly of equipment during repair or modernization is one of the undesirable operations, since even with qualified savings disassembly, the connection of worn-in parts and normal tension in grooves with fixed landings are disrupted (Tarelnyk et al., 2015). Some of the parts are damaged during disassembly (tides, quotes, flanges break, the edges of bolts and nuts are knocked off, cotter pins, rivets, etc.). Units and parts that do not require repair are generally not recommended to be removed from the equipment due to a possible decrease in the performance of the machines as a whole. Therefore, the issue of optimizing the access path to a failed unit or a worn-out part is relevant.

Analysis of major achievements and publications

When formalizing the solution to the problem of determining the sequence of disassembling a product, it is necessary to develop its mathematical model, select an optimization criterion, develop a system of indicators that limit the enumeration of a set of options, develop a method for solving the problem, present it mathematically, algorithmically and programmatically.

Sometimes in production practice, when determining the sequence of disassembly, a technological scheme for assembling a product is used. Most of the work is performed on the basis of the experience and intuition of the technologist.

The technological scheme for assembling a product is multivariate, depending on a number of factors and the optimization criteria used (Konoplyanchenko et al., 2002). Then the disassembly process will be directed in the same way. However, the conditions for disassembly and then assembly at the repair plant and the manufacturer of the product can differ significantly. The problem is not only in the availability of the necessary tools for technological equipment, but also in the cost of individual parts and assembly units, the likelihood of a defect-free

disassembly of assembly joints, the qualifications of repair personnel, the cost of assembly operations to ensure the specified accuracy, tightness, etc. Therefore, the correct choice of approach to assembly an element or a failed part will significantly affect the operability of the repaired equipment and, accordingly, the cost of the technological process of repair.

In foreign literature, when formalizing the process of partial disassembly of products, the method of Gaussian hemispheres is used (Gupta S. M. & McLean C. R., 1996). The Gaussian sphere displays the permissible directions of the movement vectors of the part of the product in free space. Since the surfaces of the parts are conjugated in assembly units, in reality they use not a sphere but a Gaussian hemisphere (Fig. 1, a), which reflects the possible directions of movement of the part during disassembly along the mating surface. Applying the techniques of Boolean algebra and mathematical logic, the problem of finding the directions of the product disassembly vectors is formalized with the help of Gaussian hemispheres. (Fig. 1, b).

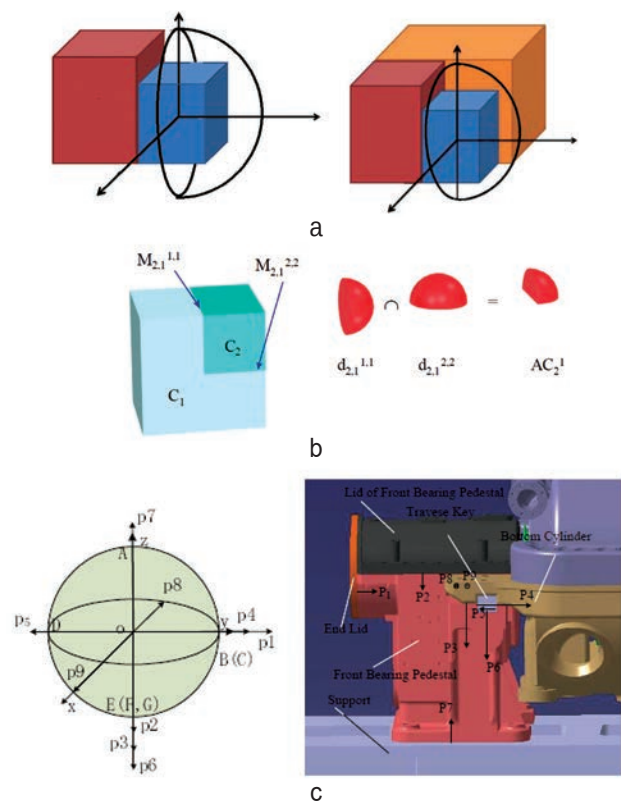


Fig. 1. Simulation of the product disassembly process

Figure 1,c shows the procedure for checking the separation of the compressor front bearing strut, where P1 – P9 are normal vectors connected surfaces for the front bearing support, points B, E, F, C, D, G and A are the points of intersection between these normal vectors and a sphere with a unit radius. Since there is no hemisphere that can accommodate all the points, the A-pillar support bearing cannot be disassembled in this state.

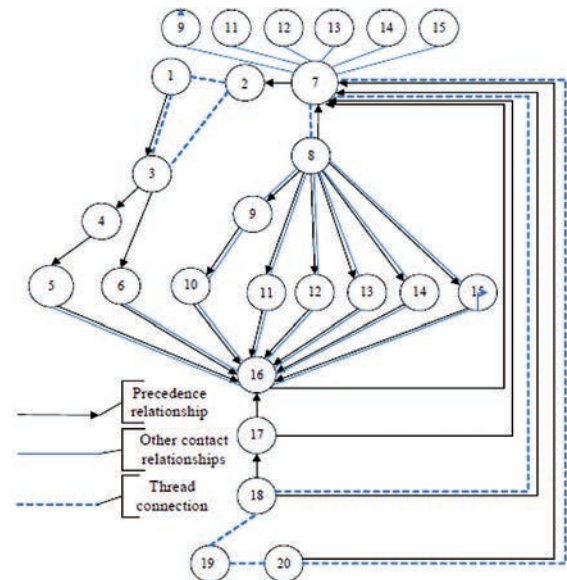
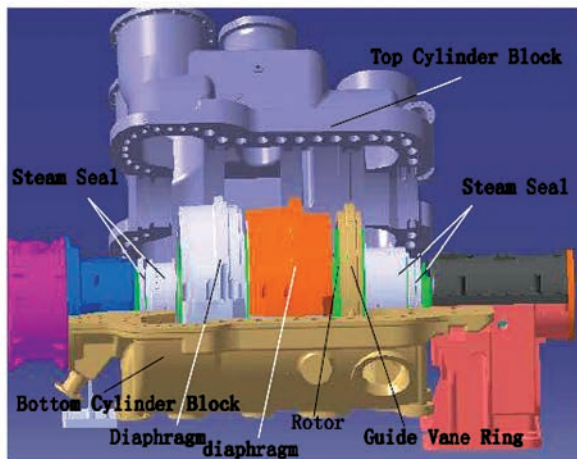


Fig. 2. Graph of the planned sequence of dismantling a steam turbine for a virtual service system

To date, a number of models and algorithms are known that are used to generate assembly and disassembly sequences of a product (H.C. Yi et al., 2003). Widespread use of disassembly and assembly sequences to formalize the generation has led to their representation in the form of AND-OR-graphs, connection graphs and Petri nets (NP) (Lakos C.A., 1995). In fig. 2 shows a simulation of the sequence of disassembling a steam turbine in a service system with elements of virtual reality (H. Zhu T. & Cong L., 2014).

The analysis of these works showed that the problem belongs to the class of NP-heavy, and, in fact, its solution is reduced to a complete enumeration or the use of the branch and bound method. Thus, it can be concluded that the existing analytical methods for generating assembly and disassembly sequences are of low efficiency.

A method called "Wave Propagation" has been widely used to formalize the generation of disassembly sequences, the essence of which is to determine the sequence of partial disassembly, minimized by the number of elements separated from the product, for specific operating conditions of the equipment (Gadh R. & Srinivasan H., 2000; Beasley D. & Martin R.R., 1993). Using this approach, two tasks are solved: – building a disassembly wave to determine the topology of access to the part, which needs to be disassembled; – determination of points of intersection of disassembly waves to form a variety of options for the disassembly sequence of the product. To implement a variety of options for solving the problem of disassembling a product, it is necessary to create an automated method for the synthesis of rational operating complexes capable of performing this task.

Research methodology

This work is devoted to the process of formalizing the search for a rational version of the layout solution for mechatronic disassembly systems.

To automate the synthesis process of a rational version of the structure, mathematical models of geometric

and kinematic displacements of assembly elements and actuators of robotic assembly equipment were derived (Konoplianchenko et al., 2020, c.186; Konoplianchenko et al., 2020, c.125).

In order to describe mathematical models, we have introduced the following conventions for elements and events of the assembly process: **a** – covering part (sleeve); **b** – male part (shaft).

Restrictions: – part **a** is stationary, fixed in the device; – part **b** is positioned relative to part **a** by the executive bodies of the assembly equipment.

The displacement diagram illustrating the mathematical models is shown in Fig. 3.

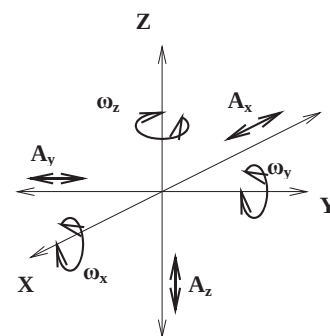


Fig. 3. Scheme of geometric displacements of assembly elements.

According to fig. The 3 main events in the build process are:

- A_x^a, A_y^a, A_z^a – linear movement of the part and along the axes (X, Y, Z);
- $\omega_x^a, \omega_y^a, \omega_z^a$ – rotation of the part a around the axes (X, Y, Z);
- A_x^b, A_y^b, A_z^b – linear movement of the part b along the axes (X, Y, Z);
- $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ – rotation of the part b around the axes (X, Y, Z).
- $S^{a,b}$ – connection of part **a** to part **b**.

Depending on the structural and kinematic diagram, industrial assembly robots are classified into 4 groups (Table 1).

Based on the developed models for disassembling products and the kinematics of industrial robots, it became possible to select a robot with an appropriate degree of mobility in an automated mode.

The next step in the selection of industrial robots is to analyze the feasibility of the task, taking into account

the accuracy, weight and dimensions of the disassembled elements. For disassembling products, those robots are selected whose technical characteristics allow disassembly taking into account the characteristics in question.

Next comes the selection of industrial robots by cost. When analyzing the manufacturability of the assembled products, first of all, those robots are selected that have a lower cost.

Table 1

Classification of industrial robots.

Kinematic diagram implementation	Block diagram of implementation	Characteristic representative
Rectangular (Cartesian) coordinate system		
		Adept SmartCartesian
Cylindrical coordinate system		
		Toshiba Machine SR-854HSP
Spherical (polar) coordinate system		
Kinematic diagram implementation	Block diagram of implementation	Characteristic representative
Angular coordinate system		

The robots are ranked based on their value. Robots with the lowest cost have the first rank. If the robot in question does not meet the selection criteria or the structure of the production site does not coincide with the structure of the disassembly technological scheme, then a robot with a large rank is selected and the analysis of production manufacturability is performed again.

According to the above classification of industrial robots (Table 1), for each class of robots it is possible to write down the condition for fulfilling the type of movement:

– rectangular (Cartesian) coordinate system

$$\exists_{\theta \in M} R_{\theta} = A_x^b \wedge A_y^b \wedge A_z^b,$$

where $M = \{1, \dots, \phi\}$ – many industrial robots of this class;
– cylindrical coordinate system

$$\exists_{\theta \in M} R_{\theta} = A_x^b \wedge A_y^b \wedge \omega_z^b,$$

where $M = \{1, \dots, \varphi\}$ – many industrial robots of this class;
– spherical coordinate system

$$\exists_{\theta \in M} R_{\theta} = \omega_x^b \wedge \omega_y^b \wedge A_z^b,$$

where $M = \{1, \dots, \tau\}$ – many industrial robots of this class;
– angular coordinate system

$$\exists_{\theta \in M} R_{\theta} = \omega_x^b \wedge \omega_y^b \wedge \omega_z^b,$$

where $M = \{1, \dots, \zeta\}$ – many industrial robots of this class.

To be able to implement each type of connection, taking into account the assembly equipment, it is necessary to describe the mathematical models of typical options for the gripping devices of manipulators. Table 2 presents mathematical models for the implementation of geometric displacements of typical gripping devices.

At the stage of synthesis of the layout solution of an industrial robot to implement a given type of connection, a logical expression is used as a condition for selecting a gripper:

$$\exists_{\xi \in I} K_{\xi} = ((\sim R_{\theta} \wedge S^{a,b}) \Rightarrow Z_{\varpi}),$$

where $I = \{1, 2, \dots, \lambda\}$ – many layout solutions.

The use of the developed methodology makes it possible to formalize the process of automated disassembly of the product, which makes it possible to introduce mechatronic systems at the stage of repairs and modernization of critical equipment.

Further research in this direction revealed that an important influence on the optimal variant of the disassembly sequence is carried out by: the availability of the necessary technological equipment and its cost; the cost of disassembly and assembly operations, debugging and control of individual machine units; the cost of individual parts included in the product; environmental safety of access to parts operating in conditions hazardous to humans.

The adaptation of the above methods consists in formalizing the process of disassembling products, taking

into account the influence of both operating conditions on the product and taking into account the degree of impact of residual negative operational factors in the product on the environment (Konoplianchenko et al., 2017, c. 27).

From the point of view of disassembly technology, a product is a set of types of connections of its parts. The process of transformation of the type of connection during operation is influenced by a number of factors: – operation time; – operating conditions; – the degree of residual impact on the environment. Time factor – for a long time of operation of parts, even under normal conditions, a change in the type of connection occurs, associated, for example, with wear of friction pairs; configurations of physical parameters of parts in contact (drying out of rubber seals, magnetization of the contact surface, etc.). The factor of operating conditions is the influence of an aggressive environment, dustiness of the working area, thermal effects, heavy loads, operation in conditions of hard radiation (increased radiation), chemical, bacteriological and other types of contamination. The factor of the degree of residual impact on the environment – determines the degree of consequences of the impact of unfavorable operating conditions on the product as a whole and the parts included in it (in particular, explosion hazard, residual radiation, biological hazard, etc.). This is how the concept of resource-saving partial disassembly of the product is realized until the part is out of order or requires replacement.

Since the problem of finding a rational disassembly technology is invariant, that is, implemented by different methods or their combination, a model for synthesizing the optimal solution is required.

RESULTS

The set of solutions to this problem at the qualitative level is described by the equation (necessary condition):

$$\forall_{\psi \in \Psi} R_{\psi} = \{R \mid \gamma_R^{\min} \leq \gamma_R \leq \gamma_R^{\max}\},$$

those. for all existing options for solving the problem (a set of technologies), the established criteria for the quality of the process must be in the range of permissible values $\lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}$, to predict the likelihood of a defect-free disassembly of critical products, to ensure the specified accuracy, tightness, etc. In addition, one of the priority criteria is the environmental safety of access to parts that operate in conditions hazardous to humans and / or the environment.

By solving the problem at the technological level (sufficient condition):

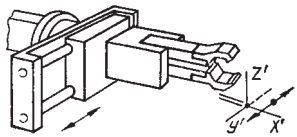
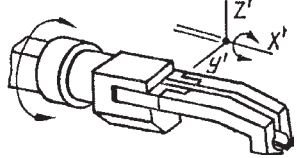
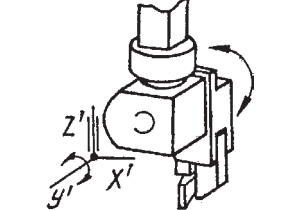
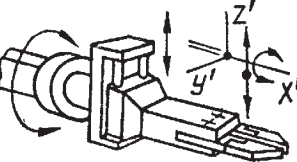
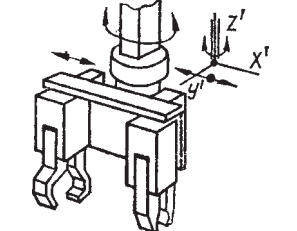
$$\exists_{\xi \in \Theta} R_{\xi} = \bigcap_{\psi=1}^{\chi} R_{\psi} \vee \bigvee_{\varphi=1}^{\phi} M_{\varphi} \vee \bigvee_{\zeta=1}^{\chi} STO_{\zeta} \vee \bigvee_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_{\varepsilon},$$

where $\exists_{\xi \in \Theta} R_{\xi}$ – the existing solution to the problem; $\bigcap_{\psi=1}^{\chi} R_{\psi}$ – a set of options for solving the problem, satisfying the necessary condition; $\bigvee_{\varphi=1}^{\phi} M_{\varphi}$ – availability of methods for solving the problem for each option; $\bigvee_{\zeta=1}^{\chi} STO_{\zeta}$ – availability of technological equipment capable of implementing the necessary methods; $\bigvee_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_{\varepsilon}$ – availability of the necessary technological modes for technological equipment for each method.

In this case, from the technological costs of the options for solving the problem that satisfies the necessary and sufficient

Table 2

Implementation of geometric displacements by typical options for the layout of gripping devices

№	Example, sketch	Mathematical model of realizable displacements
1.		$\exists_{\varpi \in \Delta} Z_{\varpi} = A_y^b,$ where Δ – many devices of this type
2.		$\exists_{\varpi \in \Phi} Z_{\varpi} = \omega_x^b,$ where Φ – many devices of this type
3.		$\exists_{\varpi \in \Theta} Z_{\varpi} = \omega_y^b,$ where Θ – many devices of this type
4.		$\exists_{\varpi \in \Omega} Z_{\varpi} = (\omega_x^b \wedge A_z^b),$ where Ω – many devices of this type
5.		$\exists_{\varpi \in \Xi} Z_{\varpi} = (A_x^b \wedge \omega_z^b),$ where Π – many devices of this type
6.		$\exists_{\varpi \in \Pi} Z_{\varpi} = (\omega_x^b \wedge \omega_y^b),$ where Π – many devices of this type

condition, a set is formed, according to the expression (Konoplianchenko et al., 2013; Konoplianchenko, 2010):

$$\{C_{P_0}\} = \bigcup_{k \in X} \left\{ C_{P_0}(k) \left| \begin{array}{l} \exists_{\xi \in \Theta} R_{\xi} = \bigcap_{\psi=1}^{\gamma} R_{\psi} \vee \exists_{\phi=1}^{\phi} M_{\phi} \vee \exists_{\zeta=1}^{\zeta} STO_{\zeta} \vee \exists_{\varepsilon=1}^{\varepsilon} TP_{\varepsilon}, \\ \forall_{\psi \in \Psi} R_{\psi} = \{R \mid \gamma_R^{\min} \leq \gamma_R \leq \gamma_R^{\max}\} \end{array} \right. \right\}$$

The optimization problem according to economic criteria (minimum technological cost) is then represented by the expression:

$$P_0^{opt} = \lim_{C_{mex} \rightarrow \min} P_0 | C_{mex} \in \{C_{P_0}\}.$$

CONCLUSIONS

The developed technological models of geometric and kinematic movements of products and executive

bodies of robots adequately describe the location of the disassembled parts in space and their movements during disassembly.

The classification of industrial robots on the basis of their structural and kinematic characteristics makes it possible to select them, taking into account the necessary kinematics and accuracy when disassembling joints, the robot's carrying capacity and the ability to work with objects of certain dimensions.

The main idea of the concept presented in the work is to develop a methodology for a systematic approach to the design of highly efficient technological systems used in the reconstruction, modernization and restoration of the operability of technical means and objects of material production in mechanical engineering.

Practical application of the proposed approach will improve the quality and safety of the process of repair and modernization of such complex equipment as special-purpose vehicles, and the introduction of a formalized methodology in real production conditions will increase the level and efficiency of the use of available technological equipment.

References:

1. Konoplianchenko, Ie. V., Kolodnenko, V. N. & Chibiryak, Ya. I. (2017). Feature of heavy-duty gas turbine compressor reengineering. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. [Compressor and power engineering], 1(47), 27-30.
2. Konoplianchenko, Ie. V., Kolodnenko, V. N. & Chibiryak, Ya. I. (2017). Osoblyvosti zastosuvannya chasovoho rezervuvannya pry zabezpechenni nadiinosti skladnykh system. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. [Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes], 8, 21-28 (in Ukrainian).
3. Tarelnyk, V., Antoszewski, B., Konoplianchenko, Ie. & Martsynkovskiy, V. (2015). Improvement of fixed joints quality by integrated technologies of electroerosive alloying. *Mechanik*, 4 (88), 178-183.
4. Konoplyanchenko, E., Zakharov, N., Radchuk, O. & Yaremenko V. (2002). Rational syntheses of technological processes of assembly. *Technical Papers of ISA: Integrated Manufacturing Solutions Real-Time Manufacturing Strategies*, 432, 109–118.
5. Gupta S. M. & McLean C. R. (1996). Disassembly of Products. *Computers and Industrial Engineering*, 31(1), 225-228.
7. Yi, H.C., Yu, B., Du, L., Li, C. & Hu D. (2003). A study on the method of disassembly time evaluation of a product using work factor method. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conferences on Systems. Man. Cybernetics*, 1753-1759.
8. Lakos, C. (1995). From Coloured Petri Nets to Object Petri Nets. In: De Michelis G., Diaz M. (eds) *Application and Theory of Petri Nets 1995. ICATPN 1995. Lecture Notes in Computer Science*, 935, 278-297. https://doi.org/10.1007/3-540-60029-9_45
9. Zhu, H. T. & Cong, L. (2014). Disassembly Sequence Planning of Steam Turbines for Virtual Maintenance. *Key Engineering Materials*, 572, 335-339. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.572.335>
10. Gadh, R. & Srinivasan, H. (2000). Assembly and disassembly sequences of components in computerized multi-component assembly models. *U.S. Software Utility Patent*, P99152US.
11. Beasley, D., & Martin, R.R., (1993). Disassembly sequences for objects built from unit cubes. *Journal of Computer Aided Design*, 25(12), 751-761.
12. Konoplianchenko, Ie.V., Yaremenko, V.P., Song, Zh., Kolodnenko, V.M. & Balo, P.M. (2020). Formalizatsiya protsesa sinteza kinematiki mehanotronnykh sborochnykh tehnikeskikh sistem. *Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Molod i tekhnichniy prohres v APV» Innovatsiini rozrobky v aharnii sferi (07-08 travnia 2020 roku)*. [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Youth and Technical Progress in AIC” Innovative developments in the agricultural sector (May 07-08, 2020)], 2, 186-189 (in Russian).
13. Konoplianchenko, Ie.V., Yaremenko, V.P., Herasimenko, V.O. & Liu Dongmei.(2020). Povyishenie effektivnosti protsesa remonta slozhnoy tehniki vnedreniem mehatronnykh sistem razborki izdeliy. *Materialy mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Ekspluatatsiina ta servisna inzheneriia» (28-29 travnia 2020 roku)*. [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Operational and Service Engineering” (May 28-29, 2020)], 125-128 (in Russian).
14. Konoplianchenko, Ie.V., Herasimenko, V.O. & Kolodnenko, V.M. (2013). Obespechenie kachestva reinzhiniringa slozhnoy tehniki vnedreniem resursosberegayuschih CALS-tehnologiy v remontnom proizvodstve. *Visnyk KhNTUSH. Tekhnichniy servis mashyn dlia rosllynnytstva*. [Bulletin of KhNTUSG. Technical service of machines for crop production], 134, 80-86 (in Russian).
15. Konoplianchenko Ie.V. (2010). Obespechenie resursosberezheniya slozhnoy tehniki na etape remonta napravlenyim vyborom tehnologii ee razborki. *Visnyk KhNTUSH. Problemy nadiinosti mashyn ta zasobiv mekhanizatsii silskohospodarskoho vyrobnytstva*. [Bulletin of KhNTUSG. Problems of reliability of machines and means of mechanization of agricultural production], 100, 317– 321.

Конопляченко Є. В., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Чибіряк Я. І., кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний

Сонг Чжаоянь, аспірант, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Черненко П. В., старший викладач, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

Рясна О. В., старший викладач, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Формалізація синтезу кінематичних структур мехатронних систем розбирання виробів на етапі ремонту складної техніки

Цю роботу присвячено процесу формалізації пошуку раціонального варіанту компоновального рішення для мехатронних систем розбирання. На основі розроблених моделей розбирання виробів і кінематики промислових робіт стало можливим вибрати робота із відповідним ступенем мобільності в автоматизованому режимі. Наступним кроком у виборі промислових робіт є аналіз доцільності виконання завдання з урахуванням точності, ваги і розмірів елементів, що розбираються. Для розбирання виробів вибирають таких робіт, технічні характеристики яких дозволяють розбирати з урахуванням розглянутих характеристик. Роботи ранжуються за їхньою вартістю. Роботи із найменшою вартістю мають перший ранг. Якщо робот не відповідає критеріям відбору, або структура виробничої ділянки не збігається зі структурою технологічної схеми розбирання, то вибирають робота більшого рангу і знову проводять аналіз технологічності виробництва.

Із погляду на технологію розбирання виріб представляється як сукупність видів з'єднань його частин. На процес трансформації типу з'єднання під час експлуатації впливає низка факторів: час роботи, умови роботи, ступінь залишкового впливу на навколишнє середовище.

Розроблені технологічні моделі геометричних і кінематичних переміщень виробів і виконавчих органів роботів адекватно описують розташування у просторі деталей, що розбираються, та їхнє переміщення під час розбирання. Класифікація промислових роботів за їхніми конструктивними і кінематичними характеристиками дозволяє виділити їх із урахуванням потрібної кінематики і точності під час розбирання з'єднань, вантажопідйомності робота і можливості роботи з об'єктами певних розмірів. Основна ідея представленої у роботі концепції полягає у розробленні методології системного підходу до проєктування високоефективних технологічних систем, що використовуються під час реконструкції, модернізації і відновленні працездатності технічних засобів та об'єктів матеріального виробництва у машинобудуванні.

Ключові слова: технологічна система, моделювання, структурний синтез, мехатронні системи, часткове розбирання, кінематичні переміщення, роботи, оптимізація.

Дата надходження 31.08.2021 р.

STUDY OF THE INFLUENCE OF GAS EXCHANGE ON THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING USING CARBON DIOXIDE

Nuianzin Vitalii Mykhailovych

PhD in Technology Sciences, Associate Professor
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University
of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine
ORCID: 0000-0003-4785-0814
nuyanzin@gmail.com

Maiboroda Artem Oleksandrovych

PhD in Pedagogy Sciences, Associate Professor
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University
of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine
ORCID: orcid.org/0000-0001-6108-9772
mayboroda101@gmail.com

Kropyva Mykhailo Oleksandrovych

PhD in Technology sciences
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University
of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine
ORCID: 0000-0002-1111-8747
mkropiva.1991@gmail.com

The purpose of the research of this work is to study the effectiveness of extinguishing a fire using carbon dioxide, taking into account changes in gas exchange. An analysis of the use of neutral gases in automatic fire extinguishing systems, which provide a three-dimensional method of extinguishing. The analysis shows that the rate of elimination of combustion will depend on the gas exchange in the room, ie the number and location of vents, doors, windows, etc. To study the effect of gas exchange on the efficiency and rate of cessation of combustion, an installation was developed, the camera of which simulates a real room and a computer model of the same room for simulation. The created installation allows to apply qualities of a phlegmatizer – carbon dioxide, nitrogen, argon, etc. The structural components of the installation are substantiated so that the phlegmatizer enters the combustion chamber from the pressure chamber, which is equipped with two openings: the first for removal of combustion products from the chamber, the second for input of phlegmatizer and two openings that simulate ventilation and inlet passage. in the cell. The amount of phlegmatizer supplied to the combustion chamber is regulated by a reducer. A thermocouple is built into the chamber to control the temperature in the combustion zone. A computer model of a combustion chamber similar to a full-scale experiment has been created. A computational experiment was performed. A full-scale experiment was conducted. It is established that the effect of open ventilation ducts on the rate of cessation of combustion is most significant at low inert gas flow rates. The relative deviation of the results of mathematical modeling from the experimental data is calculated. The results of the study show the effectiveness of modeling of thermal processes for further studies of the effect of gas exchange on the rate of fire extinguishing in closed volumes.

Key words: fire extinguishing, inert gases, fire extinguishing substances, computer simulation.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.5>

Introduction. In Ukraine, as always, the problem of fighting fires and their consequences is acute. According to the results of the analysis of fires and their consequences in Ukraine in 2020 trends that indicate an increase in the number of fires and material losses from them, people injured in fires compared to 2018 are revealed. Substances, which are conventionally called fire extinguishers are used to fight fires.

Traditionally, all substances used to stop burning are conventionally divided into 4 types (H. I. Yelahn et al., 2020; V.O. Duniushkin et al., 2011; V.O. Borovykov et al., 2000; A.V. Antonov et al., 2001; V.O. Borovykov et al., 2001; A.V. Antonov et al., 2003; T.Ie. Kisil et al., 2003; A.V. Antonov et al., 2006; N. M. Koziar et al., 2007; A. I. Turchyn et al., 2008; A.V. Antonov et al., 2010; A.V. Antonov, 2012; A.V. Antonov, 2013; A.V. Antonov et al., 2007):

– those that dilute substances in the combustion reaction zone are mainly neutral gases: nitrogen (N_2), carbon dioxide (CO_2), water vapor (H_2O), helium (He), argon (Ar) and some others;

– those that cool the reaction zone or combustible substances are mainly water, powder, sand and others;

– those that insulate substances (combustibles or oxidants) from the combustion zone are sand, fire-extinguishing powders, foam (air-mechanical, chemical);

– those that inhibit the combustion reaction (chemical active inhibitors) are some types of chemical powders and liquids that contain chemical elements of group 7 of the periodic table, – halides such as carbon tetrachloride (CCl_4), methylene bromide (CH_2Br_2), ethyl bromine (C), tetrafluorodibromoethane ($C_2Br_2F_4$) and many others.

At first glance, such a conditional division is almost unquestionable. The conditionality and relativity of such a division, that the extinguishing agent acts on the process of cessation of combustion by a combination of its physical and chemical properties, is described in many works (A.V. Antonov, 2017; A. G. Tropinov et al., 1990; A.V. Antonov, 1993; A.V. Antonov, 1995; A.V. Antonov et al., 2000; A.V. Antonov et al., 2001; Yu. B. Tsapko, 2002; D. M. Derevynskyi et al., 2004; A.V. Antonov et al., 2005; V. M. Balaniuk et al., 2006; B. B. Kovalyshyn et al., 2013; A.V. Antonov, 2013; V. O. Duniushkin et al., 2014; S. Ohurtsov, 2014; Y. Cai et al., 2015; J. G. Gatsonides et al., 2015; M. Trevits et al., 2010; Ju. V. Capko et al., 2001; DSTU 3958: 2000). For example, neutral gases, when introduced into the combustion zone, dilute the molecules of combustible substance and oxidant; their collision becomes less probable, the oxidation reaction slows down, the combustion intensity decreases, the heat release is weaker, and at a certain concentration of inert gas it stops altogether. As a result, the burning stops and the fire goes out.

It is known from the physics of combustion and explosion that when the volume concentration of oxygen in the combustion zone decreases less than 14%, kinetic (and diffusion) combustion stop. But if it is only a matter of mechanically diluting the molecules of the combustible substance with the oxidant, then it seems that it does not matter what to dilute with – nitrogen, carbon dioxide, helium, water vapor and so on. However, studies (I. M. Abduragimov, 2012) have shown that this is not the case. And the efficiency of extinguishing fires with inert gases is significantly affected by their thermophysical properties.

The dependence of the required concentration of different inhibitors and phlegmatizers for methane dilution is shown in work (I. M. Abduragimov, 2012) (Fig. 1). The figure shows that the most effective are inhibitors (halogenated hydrocarbons) and phlegmatizers (carbon dioxide and water vapor).

However, neutral gases are mainly used in automatic fire extinguishing systems, which provide a three-dimensional method of extinguishing. It is clear that the rate of fire elimination will depend on the gas exchange in the room, ie the number and location of vents, unlocked doors, windows and so on. Research in this direction, both in Ukraine and in the world is almost not conducted, so the purpose of this work is relevant.

Materials and Methods. The basics of the theory of diffusion flame extinguishing are presented in particular in the work (V.O. Dunjushkin et al., 2014). It is proved that the cessation of combustion in a gas diffusion flare occurs when at the moment of supply of extinguishing agent the rate of chemical reaction in the flame front localized in the stoichiometric composition circuit becomes insufficient for chemical conversion at given fuel and oxidant velocities. The phlegmatizer can be supplied with both oxidizer and fuel.

There are many works devoted to the determination of the minimum fire-extinguishing concentration (limiting concentrations of phlegmatizer for supply to the oxidant zone) (see, (Y.Cai et al., 2015; J. G. Gatsonides et al., 2015; M. Trevits et al., 2010; Ju.V.Capko et al., 2001). In works (Y.Cai et al., 2015; J. G. Gatsonides et al., 2015; M. Trevits et

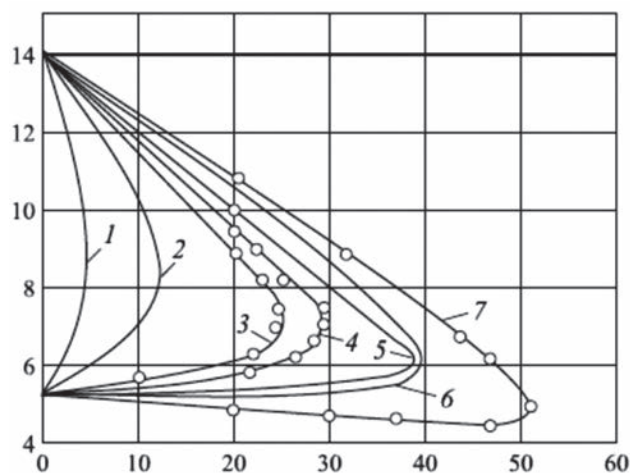


Fig. 1. Dependence of methane concentration in the mixture on the phlegmatizer content in the atmosphere: 1, 2 – halogenated hydrocarbon type $C_2Br_2F_4$; 3 – carbon dioxide CO_2 ; 4 – water vapor H_2O ; 5 – nitrogen N_2 ; 6 – helium He ; 7 – argon Ar .

al., 2010; Ju. V. Capko et al., 2001) the effect of synergism when applied to the oxidant zone by phlegmatizers of different chemical nature (for example, chemically inert and those with inhibitory action) was revealed. Based on the use of synergistic effects, new highly effective fire extinguishing compositions have been proposed (M. Trevits et al., 2010). The influence of agents of different chemical nature on the extinguishing of the diffusion flame during their supply together with the oxidant was studied in (M. Trevits et al., 2010; Ju.V.Capko et al., 2001). Thus chemical mechanisms of suppression of combustion of hydrocarbons by means of fluorinated agents are revealed.

At the same time, the analysis of literature sources in which the extinguishing of the flame diffusion torch by feeding the phlegmatizer together with the fuel was studied (G. E. Golinevich et al., 1991). One of the first works in this direction is the work (G. E. Golinevich et al., 1991), which investigated the concentration limits of diffusion combustion of the mixture $H_2 + He$ in the air. Along with this, the study of the conditions of stabilization of diffusion flares of mixtures of hydrogen and methane with various inert solvents should be noted (Golinevich, G.E. et al., 1991).

To study the effect of gas exchange on the efficiency and rate of combustion cessation, an installation was developed (Fig. 2), the chamber of which simulates a real room and a computer model (Fig. 3) of the same room for simulation.

The closest analogue to the technical essence of the device is a gas fire extinguishing system (O.A.Derevianko et al., 2018), which contains a cylinder with a gas extinguishing agent, shut-off valves, pipelines and outlets. However, this installation does not provide for the possibility of regulating the flow of extinguishing agent and changing the number of open armholes.

Results. The installation (Fig. 2) works according to the following scheme. From the pressurized tank the phlegmatizer comes to the combustion chamber

(simulation room), equipped with two (working) holes: the first to remove combustion products from the chamber, the second to enter the phlegmatizer and two holes that simulate ventilation and inlet and allow to change gas exchange in the chamber. The amount of phlegmatizer supplied to the combustion chamber is regulated by a reducer. A thermocouple is built into the chamber to control the temperature in the combustion zone.

When introducing a neutral gas into the combustion zone, in addition to reducing the concentration of the components of the combustible mixture, there is also a loss of heat for heating this diluent from the initial temperature to the temperature of the combustion zone. The installation allows to use as a phlegmatizer – carbon dioxide, nitrogen, argon, etc..

During our research (Fig. 4), carbon dioxide was chosen as the phlegmatizer (CO_2). A paraffin candle was chosen as the source of combustion. The experiment was conducted in two modes: 1 – all armholes are open, 2 – all armholes

are closed. The temperature change was recorded using a DT-838 multimeter complete with thermocouples. During the research, the time from the beginning of the supply of carbon dioxide to the combustion zone to the cessation of combustion was recorded. To correlate the results, 2 experiments were performed.

The study was conducted at carbon dioxide feed rates of 60, 80 and 100 l / min.

The results of the research are presented in the graph (Fig. 5). They show that the cessation of combustion with closed vents (gas exchange mode № 1) occurs faster than with open vents (gas exchange mode № 2). So at a feed rate of carbon dioxide equal to 40 l / min it happens 4 s faster, which is more than 40% faster; at a carbon dioxide feed rate of 60 l / min this happens 3.5 s faster, which is more than 35% faster; at a carbon dioxide feed rate of 80 l / min this is 3.3 s faster, which is more than 35% faster; at a carbon dioxide feed rate of 100 l / min 1.9 s, which is more than 25% faster.

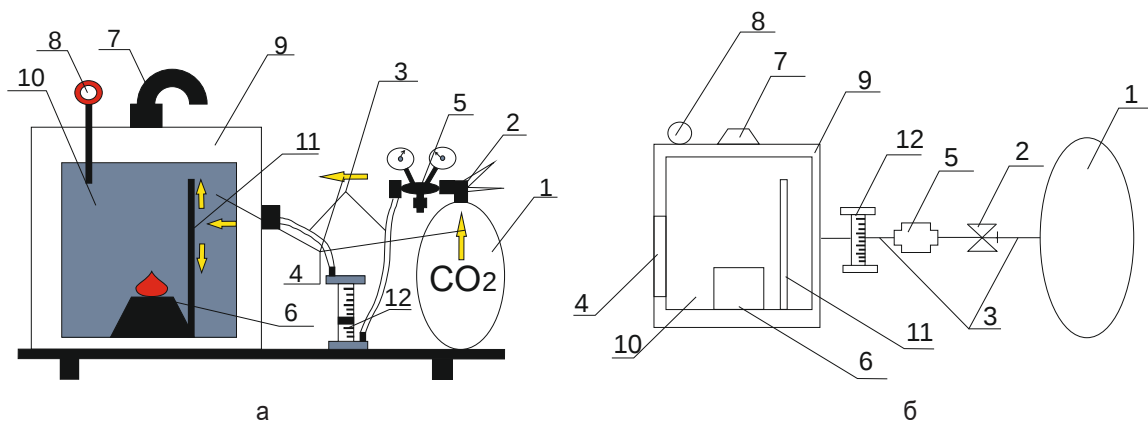


Fig. 2. Installation for the study of cessation of combustion by phlegmatization (a); constructive scheme of installation (b):

1 – container with phlegmatizer under pressure; 2 – the valve; 3 – flexible pipeline; 4 – an opening for air inflow with a latch, 5 – a reducer; 6 – combustible substance; 7 – hole for removal of combustion products; 8 – temperature sensor; 9 – isolated camera; 10 – heat-resistant glass; 11 – screen; 12 – rotameter.

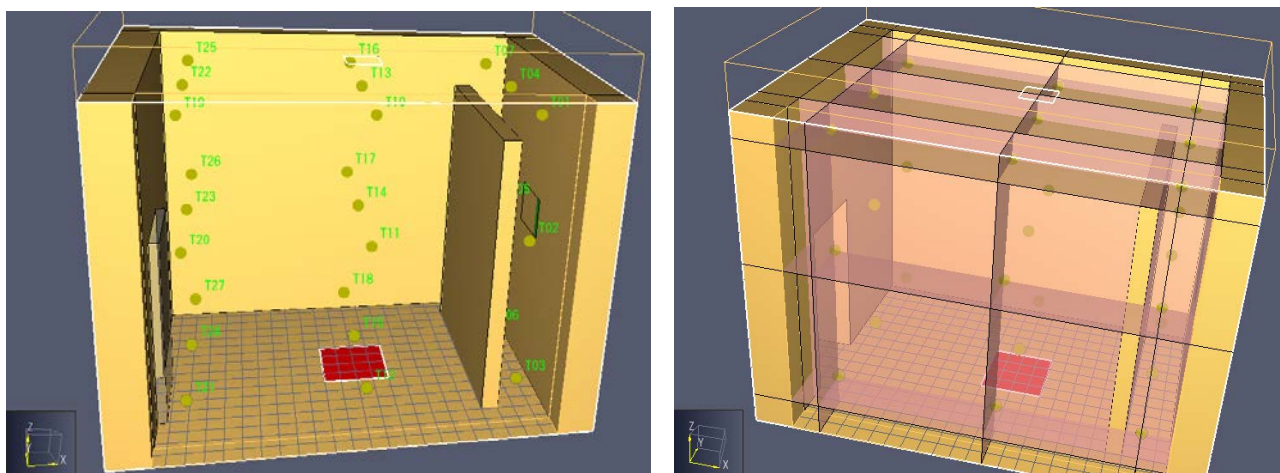


Fig. 3. The view of the model of the simulation room, which was used for the computational experiment (yellow dots show the places of calculation of temperatures)



Fig. 4. Conducting experimental studies to determine the effect of gas exchange on the rate of extinguishing a fire with carbon dioxide

From this we can conclude that the effect of open ventilation ducts (window doors) on the rate of cessation of combustion is most significant at low inert gas flow rates. And also that increasing the speed of flow rate of phlegmatizers in a burning zone extinguishing time decreases.

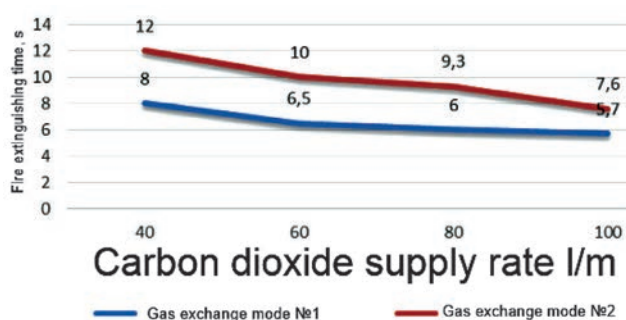


Fig. 5. Graph of the dependence of time (from the moment of the beginning of supply of carbon dioxide to the cessation of combustion) on the mode of gas exchange and the rate of supply of extinguishing agent

To conduct a computational experiment using the created mathematical model of the model room (Fig. 3) for testing the following sequence of calculation procedures was used.

1. With the help of CAD program the geometric configuration of the model room of the necessary sizes is created. Inside, models of partitions, openings for the exit of combustion products and places of air support are created. The geometric model is imported into the environment of the FDS calculation complex.

2. The initial parameters of modeling are entered, as it is impossible to change in the course of calculation: initial temperature of the environment, support of air on the one hand, necessary time of burning, etc..

3. The combustion process is initiated in the middle part of the room. For this purpose the fire center is modeled.

4. During the calculation, the temperature of the respective points in the room and the temperature gradient are monitored online.

In order to control the temperature regime by means of the computer complex FDS 27 places of its control were created (yellow dots of fig. 3).

After completion of the computational experiment, temperature data were obtained at each control point for verification.

Discussion. In fig. 6, 7 there are graphs of the average temperature in the middle of the model room during the computational experiment.

As a result of calculations of cessation of combustion in the model room with closed vents with a carbon dioxide supply rate of 40, 60, 80 and 100 l / min. we obtained the following time intervals for cessation of combustion – 8.2; 6.7; 6.3 and 5.8 seconds.

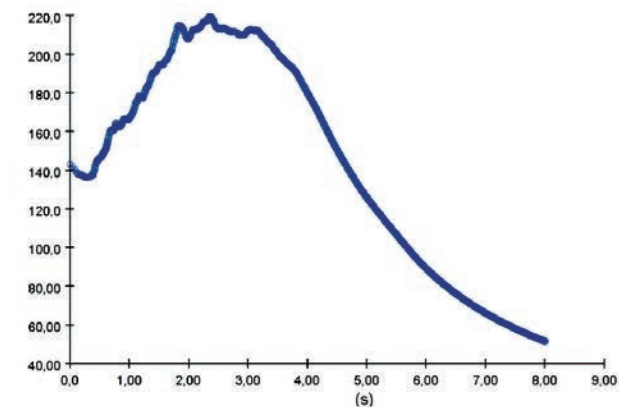
As a result of calculations of combustion cessation in the model room with open vents with a carbon dioxide supply rate of 40, 60, 80 and 100 l / min. we obtained the following time intervals for cessation of combustion – 12.4; 10.3; 9.6 and 7.8 seconds.

Analyzing the comparison of the results of mathematical modeling of the heat transfer process (Fig. 7) in case of fire in the model room and experimental data, it can be stated that the relative deviation averages 5.6%, which shows the efficiency of modeling thermal processes for further studies of gas exchange on fire extinguishing rate in closed volumes.

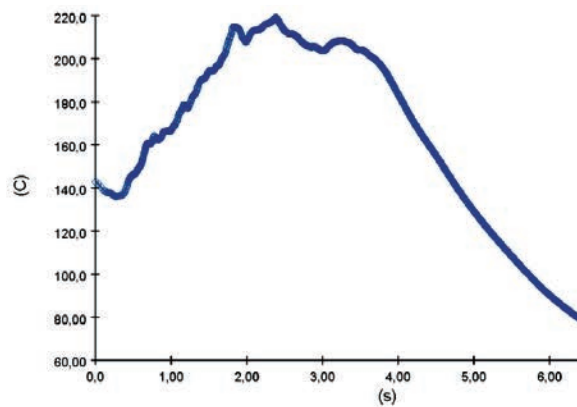
Conclusions. This work investigates the effect of gas exchange on the efficiency of extinguishing fires with carbon dioxin by conducting experimental studies on a specially designed installation and by computational experiment using the software package CFD Fire Dynamics Simulator 6.2. The efficiency of modeling of thermal processes for further research of the influence of gas exchange on the rate of extinguishing fires in closed volumes is proved. To achieve this goal, the following tasks were performed:

1. A mathematical model of the model room, similar to the full-scale experiment was created. A computational experiment was performed. A full-scale experiment was conducted.

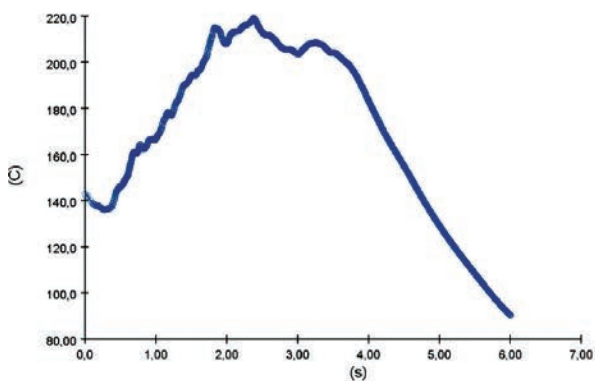
2. It is established that the influence of open ventilation ducts (window doors) on the rate of cessation of combustion



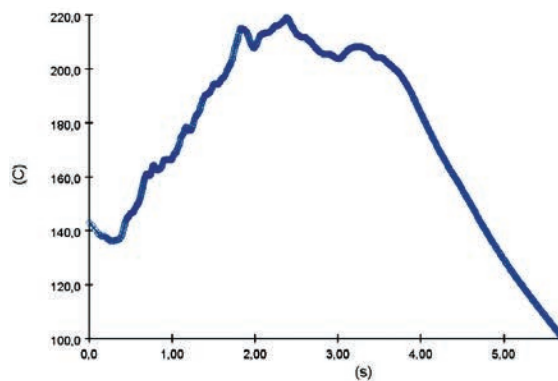
a



б

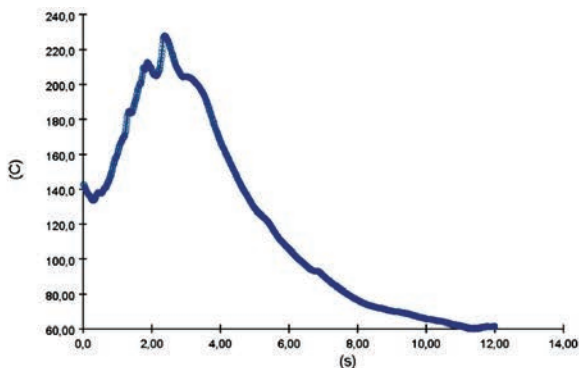


в

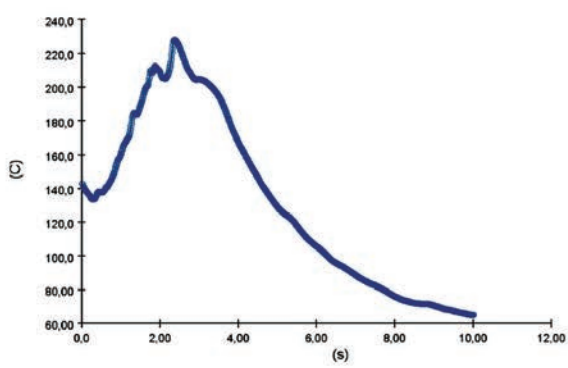


г

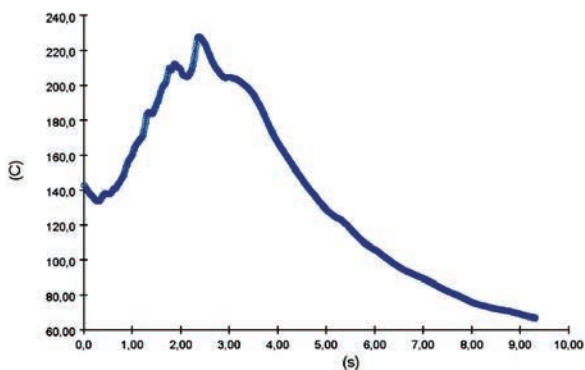
Fig. 6. Change of average temperature in a model room at the closed ventilating apertures and various speeds of supply of carbon dioxide (a – 40 l / min., б – 60 l / min., в – 80 l / min., г – 100 l / min)



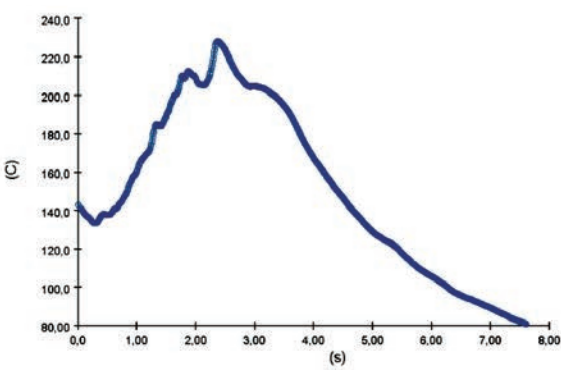
a



б



в



г

Fig. 7. Change of average temperature in a model room at open ventilating apertures and various speeds of supply of carbon dioxide (a – 40 l / min., б – 60 l / min., в – 80 l / min., г – 100 l / min)

is most significant at low velocities of inert gases. It is also established that with increasing speed of phlegmatizers entering the combustion zone, the extinguishing time decreases and the cessation of combustion with closed vents occurs faster than with open vents. So at a feed rate of carbon dioxide equal to 40 l / min it happens 4 s faster, which is more than 40% faster; at a carbon dioxide feed rate of 60 l / min this happens 3.5 s faster, which is more than 35% faster; at a carbon dioxide feed rate of 80 l / min this is 3.3 s faster,

which is more than 35% faster; at a carbon dioxide feed rate of 100 l / min 1.9 s, which is more than 25% faster.

3. The relative deviation of the results of mathematical modeling from the experimental data, which is 5.6%, is calculated.

4. The results of the study show the effectiveness of modeling of thermal processes for further studies of the effect of gas exchange on the rate of fire extinguishing in closed volumes.

References:

1. Yelahn H. I., Tyshchenko Ye. O., Aliksieiev A. H., Nuianzin V. M., Maiboroda A. O. (2020). Vynyknennia i rozvytok horinnia ta vybukhu. Prypynennia horinnia [Occurrence and development of fire and explosion. Stopping burning]. Cherkaskyi instytut pozhezhnoi bezpeky imeni Heroiv Chornobylia, NUTsZ Ukrainy, Cherkasy, 434 (in Ukrainian).
2. Duniushkin V.O., Ohurtsov S. Iu., Antonov A.V., Pyvovar P.V. (2011). Vplyv neodnochasnosti spratsovuvan moduliv systemy poroshkovoho pozhezhohasinnia na efektyvnist hasinnia horiuchykh ridyn [Influence of non-simultaneity of operation of modules of the powder fire extinguishing system on the efficiency of extinguishing flammable liquids]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (24), 185-190 (in Ukrainian).
3. Duniushkin V.O., Ohurtsov S. Iu., Pyvovar P.V., Sementsov O.A. (2011). Doslidzhennia z pidvyshchennia vohnehasnoi efektyvnosti moduliv poroshkovoho pozhezhohasinnia «SPRUT» [Research to increase the fire extinguishing efficiency of powder fire extinguishing modules "SPRUT"]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (23), 47-50 (in Ukrainian).
4. Borovykov V.O., Biloshytskyi M.V., Antonov A.V. (2000). Doslidzhennia z rozrobky retseptury pinoutvoriuvacha na osnovi alfaolefinsulfonativ natriiu [Research on the development of a foaming agent formulation based on sodium alpha-olefin sulfonates]. Kharkov: KhYPB MVD Ukrainy, Problemy pozharnoi bezopasnosti, Vyp. 7, 41-46 (in Ukrainian).
5. Antonov A.V., Borovykov V.O., Biloshytskyi M.V. (2001). Doslidzhennia pinoutvoriuvacha spetsialnogo pryznachennia dlia hasinnia pozhezh "PPLV-(Universal)" i rozroblennia rekomendatsii shchodo yoho zastosuvannia [Research of the special-purpose foaming agent for fire extinguishing "PPLV- (Universal)" and development of recommendations on its application]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 4, 37-47 (in Ukrainian).
6. Borovykov V.O., Antonov A.V., Biloshytskyi M.V. (2001). Rozrobka pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh v Ukraini [Development of foaming agents for fire extinguishing in Ukraine]. Sevastopol: Sbornyk nauchnykh trudov SYIaEP, 4, 177-182 (in Ukrainian).
7. Antonov A.V., Borovykov V.O., Biloshytskyi M.V., Derevynskyi D.M. (2003). Doslidzhennia vlastyvosti plivkoutvoriuvalnykh shnoutvoriuvachiv i rozroblennia rekomendatsii shchodo yikh zastosuvannia dlia «pidsharovoho» hasinnia pozhezh u rezervuarakh dlia zberihannia nafty i naftoproduktiv [Research of properties of film-forming schno-formers and development of recommendations on their application for "sublayer" fire extinguishing in tanks for storage of oil and oil products]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (8), 58-64 (in Ukrainian).
8. Kisil T.Ie., Kovalyshyn V.V., Borovykov V.O., Antonov A.V. (2003). Zastosuvannia karbamidu z metoiu pidvyshchennia vohnehasnoi efektyvnosti piny [The use of urea to increase the fire-fighting efficiency of the foam]. Lviv: LIPB, Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr., 3, 113-118 (in Ukrainian).
9. Antonov A.V., Borovykov V. O., Slutskia O. M., Koziar N. M., Biloshytskyi M. V. (2006). Osnovni polozhennia proektu novoi redaktsii instruksii pro poriadok zastosuvannia i vyprovuvannia pinoutvoriuvachiv dlia pozhezhohasinnia [The main provisions of the draft new version of the instructions on the application and testing of foaming agents for firefighting]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1(13), 97-101 (in Ukrainian).
10. Koziar N.M., Borovykov V.O., Antonov A. V., Kovalyshyn V. V. (2007). Vidnovlennia pokaznykiv yakosti vodnykh i vodopinnykh vohnehasnykh rehovyn – zariadiv vohnehasnykiv ta system pozhezhohasinnia [Restoration of quality indicators of water and water-foam fire extinguishing substances – charges of fire extinguishers and fire extinguishing systems]. Lviv: LIPB, Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr., 11, 27-37 (in Ukrainian).
11. Turchyn A.I., Antonov A.V. (2008). Teoretychni i praktychni pytannia zastosuvannia tekhnolohii tonkoho rozpyliuvannia vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Theoretical and practical issues of application of technologies of fine spraying of water extinguishing agents]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (17), 138-145 (in Ukrainian).
12. Turchyn A.I., Borovykov V.O., Antonov A.V., Koziar N.M. (2008). Doslidzhennia z vyznachennia pokaznykiv yakosti deiakykh vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Research to determine the quality of some aqueous extinguishing agents]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (18), 110-115 (in Ukrainian).
13. Antonov A.V., Turchyn A.I. (2010). Rozroblennia rekomendatsii shchodo proektuvannia, montuvannia ta ekspluatatsii avtomatychnykh system kombinovanoho pozhezhohasinnia modulnogo typu tonkorozpylenymy vodnymy vohnehasnymy rehovynamy [Development of recommendations for the design, installation and operation of automatic modular fire extinguishing systems of modular type with finely divided aqueous extinguishing agents]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (22), 159-165 (in Ukrainian).
14. Antonov A.V. (2012). Inhibuvalni ta vohnehasni vlastyvosti tonkorozpylenykh vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi karbonatu i nitratu kaliiu [Inhibitory and extinguishing properties of finely divided aqueous extinguishing agents based on potassium carbonate and nitrate]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (25), 117– 125 (in Ukrainian).
15. Antonov A.V. (2013). Vohnehasna efektyvnist strumeniv tonkorozpylenykh vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Extinguishing efficiency of jets of finely dispersed aqueous extinguishing agents]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (27), 133-137 (in Ukrainian).

16. Antonov A.V., Turchyn A.I. (2007). Naturni vohnevi vyprobuвання avtomatychnoi ustanovky pozhezhohasinnia tonkorozpylenymi vodnymi vohnehasnymi rehovynami na Kurakhivskii TES TOV «SKHIDENERHO» [Full-scale fire tests of the automatic fire extinguishing installation with finely sprayed water extinguishing agents at Kurakhivska TPP of SKHIDENERGO LLC]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (15), 98-102 (in Ukrainian).
17. Koziar N.M., Borovykov V.O., Antonov A.B., Kovalyshyn V.V. (2007). Zberihannia nafty i naftoproduktiv [Storage of oil and oil products]. Lviv: Visnyk LDU BZhD, 1, 12-18 (in Ukrainian).
18. Antonov A.V. (2017). Uzahalennia i rozvytok naukovykh osnov rozroblennia ta tekhnolohii zastosuvannia ekolohichno pryiniatnykh vohnehasnykh rehovyn [Generalization and development of scientific bases of development and technology of application of ecologically acceptable fire extinguishing substances]. Kyiv: Dysertatsiina robota na zdobuttia stupeniu doktora tekhnichnykh nauk, 386 (in Ukrainian).
19. Tropinov A.G., Zhartovskij V.M., Antonov A.V., Baratov A.N. (1990). Vzaimodejstvie smesey diammonijfosfata i hlorida kalija s aktivnymi radikalami plameni heptana [Interaction of mixtures of diammonium phosphate and potassium chloride with active radicals of the flame of heptane]. Moskva: Nauchnyj zhurnal Akademii nauk SSSR «Kinetika i kataliz», (tom 29), 524-527 (in Russian).
20. Antonov A.V. (1993). Teoreticheskie i prikladnye voprosy sozdaniia i proizvodstva ognetchashchih veshchestv v Ukraine [Theoretical and applied issues of creation and production of fire extinguishing agents in Ukraine]. Harkov: Min. obr. Ukrainy, MVD Ukrainy, Problemi pozhezhnoi bezpeki, 102-105 (in Russian).
21. Antonov A.V. (1995). Teoriia i praktika razrabotki ognetchashchih veshchestv [Theory and practice of the development of fire extinguishing agents]. Kiev: MVS Ukraïni, Problemi pozhezhnoi bezpeki, 45 – 47 (in Russian).
22. Antonov A.V., Orel V.P., Stetsenko V.P., Kot A.P. (2000). Suchasnyi stan problemy rozrobky ta vykorystannia ekolohichno bezpechnykh hazovykh vohnehasnykh rehovyn [The current camp of the problem of the development of the environmentally safe gas in the fire-extinguishing rivers]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1(2), 10-13 (in Ukrainian).
23. Antonov A.V., Hamera A.B., Nekhaev V.V., Sushko V.O. (2001). Kontseptsiiia zmenshennia zalezhnosti Ukrainy vid vykorystannia ozonoruivnykh rehovyn hrupy haloniv u sferi pozhezhnoi bezpeky [The concept of decreasing the fallowness of Ukraine from the management of ozone-reducing rivers of groups of halons in the sphere of pozhezhnoi safety]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 3, 93-96 (in Ukrainian).
24. Tsapko Yu.B., Orel V.P., Antonov A.V. (2002). Vyznachennia umov flehmatyzuvannia azotom horiuchoho hazovoho seredovyshcha u fiksovanomu ob'emi zalezho vid parametriv nadkhodzhennia komponentiv [The value of the minds of the phlegmatization of a combustible gas medium with nitrogen at a fixed volume is stored in terms of the parameters of the appropriate components]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (6), 102-108 (in Ukrainian).
25. Derevynskiy D.M., Antonov A.V., Zhartovskiy V.M., Tsapko Yu.V. (2004). Doslidzhennia inhibuvalnoi, vohnehasnoi ta flehmatyzuvalnoi zdatsnosti pentaforetanu (HFC 125) ta yoho sumishei z dioksydom vuhletsiiu [Pentafluoroethane (HFC 125) and carbon dioxide supplementation]. Lviv: LIPB, UkrNDIPB MNS Ukrainy, Pozhezhna bezpeka, Zb. nauk. Prats, 5, 42-49 (in Ukrainian).
26. Antonov A.V., Derevynskiy D.M. (2005). Pozhezhna nebezpeka ta deiaki shliakhy udoskonalennia protypozhezhnoho zakhystu hazokompresornykh stantsii [Pozhezhnaya nebezpeka and deyaki shlyakhi is perfect for the anti-fire operation of gas compressor stations]. Lviv: LIPB, UkrNDIPB MNS Ukrainy, Pozhezhna bezpeka, Zb. nauk. Prats, 6, 89-98 (in Ukrainian).
27. Balaniuk V.M., Tsapko Yu.V., Antonov A.V., Sokolenko K.I. (2006). Inhibuvalni vlastyivosti deiakykh aerolozutuvaniivnykh spoluk (AUS) na osnovi solei kaliu [Inhibuvalny authorities of acts of aerosol-making spoluks (AUS) based on calcium salts]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (14), 66-69 (in Ukrainian).
28. Kovalyshyn B.B., Antonov A.B., Zinchenko I.M., Honcharenko S.I. (2013). Modeliuvannia hasinnia pozhezh v zakrytykh ob'iemakh inhibitoramy horinnia [Models of gasinnya pozhezh in cryptic cases]. Lviv: LIPB, Pozhezhna bezpeka, Zb. nauk. Prats, 22, 113-120 (in Ukrainian).
29. Antonov A.V. (2013). Vohnehasna efektyvnist binarnykh sumishei halonu 2402 ta khladonu 3 MTM «Novec» 1230 [Fire-fighting efficiency of binarial sums to halon 2402 and freon 3 MTM "Novec" 1230]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2 (28), 198-202 (in Ukrainian).
30. Duniushkin V.O., Ohurtsov S.I., Antonov A.V., Tsymbalistyi S.Z. (2014). Obgruntuvannia vyboru hazovoi vohnehasnoi rehovyny dlia flehmatyzatsii ob'iemiv «sukhykh» vidsikiv rakety-nosija [Establishing the vibration of the gas in the fire-extinguishing speech for phlegmatization of the "dry" types of the rocket-carrying]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1 (29), 108-114 (in Ukrainian).
31. Ohurtsov S. (2014). Provesti doslidzhennia ta obg'runtuvati robochi parametri sistemi poperedzhennia pozhezhi ta vibuhu (flegmatyzuvannia) «suhih» vidsikiv rakety-nosija pid chas pol'otu [Carry out the finalization and adjustment of the working parameters of the system and the advancement of the fire and vibration (phlegmatization) of "dry" displays of the rocket-carrying for an hour]. Kyiv: UkrNDIPB, Zvit pro NDR (in Ukrainian).
32. Dunjushkin V.O., Ohurtsov S. Y., Antonov A. V., Cimbalistij S. Z. (2014). Obg'runtuvannia voboru gazovoi vognegasnoi rehovini dlia flehmatizatsii ob'jemiv "suhih" vidsikiv rakety-nosija [Establishing the vibration of the gas fire-gas speech for phlegmatization of the "dry" types of the rocket-carrying]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 1, 108–114 (in Ukrainian).
33. Cai Y. et al. (2015). Experimental study of an aircraft fuel tank inerting system. Chinese J. Aeronaut. Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2(28), 394–402 (in English).
34. Gatsonides J.G. et al. (2015). Fluorinated halon replacement agents in explosion inerting. J. Loss Prev. Process Ind. Elsevier Ltd, 1–9 (in English).
35. Trevits M. et al. (2010). Use Of CFD Modeling To Study Inert Gas Injection Into A Sealed Mine Area. SME Annu. Meet. 1–8 (in English).

36. Capko Ju. V., Orel V. P., Sljepchenko V. F. (2001). Vznachennja minimal'nih flegmatizuval'nih koncentracij gazovih vognegasnih rečovindlja sumishej povitrja z parami legkozajmistih ridin [The value of the minimum phlegmatizing concentrations of gas in the fire-extinguishing springs for the summit with vapors of easy-to-use ridin]. Kyiv: Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 3, 84-87 (in Ukrainian).
37. DSTU 3958:2000 (2000). Gazovi vognegasni rečovini. Nomenklatura pokaznikov jakosti, zagal'ni tehnični vimogi ta metodi viprobuvan' [Gas in the fire-fired speech. Nomenclature of indicators of quality. General technical vimogues and methods viprobuvan']. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukrai'ni, 26 (in Ukrainian).
38. Abduragimov I. M. (2012). O mehanizmah ognetushashhego dejstvija sredstv pozharotushenija [On the mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means]. Moskva: Pozharovzryvbezopasnost', 4(21), 60-82 (in Russian).
39. Golinevich, G.E. i dr. (1991). Estestvennaja stabilizacija i sryv otorvannogo turbulentnogo diffuzionnogo gazovogo fakela [Natural stabilization and separation of a detached turbulent diffusion gas plume]. Moskva: Fizika gorenija i vzryva, 5, 76-81 (in Russian).
40. Derevianko O.A., Antoshkin O.A., Bondarenko S.M. y dr. (2018). Suchasni systemy avtomatychnoho pozhezhozasinnia [Modern means of automatic fire extinguishing]. Kharkiv, NUTsZU, 271 (in Ukrainian).

Нуязін В.М., кандидат технічних наук, доцент, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

Кропива М.О., кандидат технічних наук, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

Майборода А.О., кандидат педагогічних наук, доцент, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

Дослідження впливу газообміну на ефективність гасіння пожеж діоксидом вуглецю

Метою дослідження є вивчення ефективності гасіння пожежі діоксидом вуглецю з урахуванням зміни газообміну. Проведено аналіз застосування нейтральних газів у системах автоматичного пожежогасіння, що передбачають об'ємний спосіб гасіння. Під час аналізу встановлено, що швидкість ліквідації горіння залежатиме від газообміну у приміщенні, тобто від кількості та місць розташування вентиляційних отворів, дверей, вікон тощо. Задля дослідження впливу газообміну на ефективність і швидкість припинення горіння розроблено установку, камера якої імітує реальне приміщення і його комп'ютерну модель для проведення моделювання. Створена установка дозволяє застосовувати як флегматизатор діоксид вуглецю, азот, аргон тощо. Обґрунтовано структурні компоненти установки таким чином, що із ємності під тиском надходить флегматизатор до камери для спалювання, обладнаної двома отворами: перший отвір служить для відведення продуктів горіння із камери, другий – для введення флегматизатора через два отвори, які імітують вентиляцію і вхідний прохід, дозволяючи змінювати газообмін у камері. Кількість флегматизатора, що подається до камери спалювання, регулюється редуктором. У камеру вмонтовано термопару для контролю температури у зоні горіння. Створено комп'ютерну модель камери для спалювання, аналогічну натурному експерименту. Комп'ютерну модель приміщення із заданими геометричними конфігураціями і розмірами створено за допомогою CAD-програми. Усередині також було створено моделі перегородок, отвору для виходу продуктів згоряння і місця підпору повітря. Геометричну модель імпортовано у середовище розрахункового комплексу FDS для подальшого проведення обчислювального експерименту. Проведено обчислювальний експеримент. Із метою відслідковування зміни температурного режиму під час обчислювального експерименту засобами комп'ютерного комплексу FDS створено 27 місць її контролю. Після завершення обчислювального експерименту отримано показники температури за кожним місцем контролю для проведення верифікації. Проведено натурний експеримент. Установлено, що вплив, який чинять відкриті вентиляційні канали на швидкість припинення горіння, є найсуттєвішим за низьких швидкостей подачі інертних газів. Розраховано відносне відхилення результатів математичного моделювання від експериментальних показників. Результати проведеного дослідження свідчать про ефективність моделювання теплових процесів під час подальшого вивчення впливу газообміну на швидкість гасіння пожеж у закритих об'ємах.

Ключові слова: пожежогасіння, інертні гази, вогнегасні речовини, комп'ютерне моделювання.

Date of receipt 30.08.2021

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГНУЧКОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0001-7843-0922

presto5@bigmir.net

Проектування гнучких виробничих систем (ГВС) сучасного багатонаменклатурного виробництва зазвичай ведеться на основі загального нормування при використанні укрупнених рекомендацій. При цьому не завжди береться до уваги специфіка та особливості конкретного виробництва. В такому проектуванні найважливішим є досвід проектувальника, що не завжди базується на сучасних методах оптимізації проектних рішень. Тому надзвичайно актуальною є проблема створення автоматизованих систем проектування при розробці гнучких автоматизованих виробництв (ГАВ), які використовують вартісне обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Розробка автоматизованих систем проектування базується на ідеях системного підходу, які визначають різні цикли процесу: проектування – підготовка виробництва – виробництво. Інформація про спроектований об'єкт генерується в процесі розробки проекту різними групами користувачів: дослідниками, проектувальниками, конструкторами, технологами, організаторами виробництва. Багаторівневий, циклічний процес проектування потребує використання такого обсягу інформації, який неможливо переробити без застосування сучасних математичних методів та обчислюваної техніки. Тому надзвичайно важливим є створення систем автоматизованого проектування ГАВ, які відзначаються більшою універсальністю, ефективністю і можливістю розвитку, вдосконалення і адаптації до умов різних підприємств. Такі вимоги послужили базою для створення системи автоматизованого проектування ГВС (САП ГВС), що дозволяє протягом розробки проекту враховувати величезний обсяг інформації в автоматичному циклі. Наукова новизна роботи полягає в розробленні інтегрованої системи автоматизації проектування технології обробки та вибору елементів структур ГВС. При цьому забезпечується інформаційна єдність з системою технологічної підготовки виробництва на рівні експлуатації ГВС.

Мета роботи – створення інтегрованої автоматизованої системи проектування технологічних процесів та елементів структури гнучкого автоматизованого виробництва на базі сучасних верстатів з ЧПУ, промислових робіт та систем оснащення.

Ключові слова: проектування, автоматизація, верстат, база даних, алгоритм.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.6>

Вступ. Створення автоматизованих систем проектування гнучких виробничих систем (САП ГВС) базується на ідеях системного підходу. Цей багаторівневий процес викликає неймовірне збільшення обсягу інформації, що на тлі стикування потреб різних користувачів не дозволяє повністю забезпечити вимоги промисловості по широкому впровадженню методів автоматизації проектування. У цих умовах необхідно розробка систем, які є більш універсальними, ефективними і здатними до розвитку та адаптації до конкретного виробництва. Основою розробленої САП ГВС є математична модель технологічного проектування ГВС та методи формалізованого проектування її елементів та структур (Pukhovskiy, 2010). Програмний комплекс САП ГВС базується на формалізації проектних процедур, основаних на розробленій теорії автоматизації технологічного проектування (Domoradskij, Leskin, Ronomarev, 1986), на основі якої створюються пакети прикладних програм функціональних підсистем. Структура САП ГВС базується на програмних та інформаційних компонентах, що дозволяє вирішувати задачі різних функціональних підсистем на єдиній інформаційній базі та швидко створювати і розвивати систему технологічної підготовки багатонаменклатурного виробництва.

Функціональна структура САП ГВС дозволяє вирішувати задачі проектування елементів ГВС, базуючись на

розробці технологічних процесів, тобто постулюється, що технологія завжди має бути первинною. Заперечення цього твердження приводить до суттєвих помилок в проектуванні структури ГВС, збільшення затрат та зниження продуктивності виробництва (Melnikov, Voronenko, 1990). Функціональна інтеграція підсистем здійснюється ще на етапі технологічного проектування, при цьому на вході задаються вихідні дані та концепція задачі, а на виході формуються проектні рішення у вигляді математичної моделі.

Результати дослідження. Основою створення САП ГВС є схема проектування елементів верстатної системи (ВС) за принципом циклічної стратегії (рис. 1). У відповідності до цієї схеми вибір складових частин ГВС проводиться послідовно або паралельно, окремі задачі потребують циклічної процедури. На етапі аналізу початкового виробництва, коли проводиться відбір даних, роботи ведуться паралельними потоками, тому що вони не впливають одне на одного.

У блоках «проектування елементної технології» та «групування технологічних об'єктів» створюється інформація, яка використовується на наступних етапах проектування (Pukhovskiy, 2009). Вибір основного технологічного обладнання (ОТО) передбачає вибір не тільки верстатів з ЧПУ, а й транспортних засобів, ріжучого,

допоміжного і вимірювального інструменту, а також системи забезпечення технологічних процесів. Виконання всіх цих процедур вимагає використання даних, одержаних в блоках розробки елементної технології та групування технологічних об'єктів та рішень.

Обговорення. Після визначення структури ГВС, складу основного та допоміжного обладнання приступають до розробки планувальних рішень ГВС. Імітаційне моделювання дозволяє зробити оцінку організаційно-технологічної структури ГВС за критеріями: продуктивності виробництва, термінів обробки деталей, завантаження обладнання, часу його простоїв і таке інше.

У блоці оптимізації приймається рішення про завершення процедури проектування або повернення у блок групування для створення та виконання нової процедури для іншої групи деталей.

Загальна структура САП ГВС показана на рис. 2. Основу САП складають бази даних: «елементної технології», основного технологічного обладнання (ОТО),

інструментального оснащення (ІО), транспортного обладнання (ТО), технологічного оснащення тощо, а також бази знань, які відображають процедури проектування різних функціональних підсистем на єдиній інформаційній базі, оперативно створювати, нарощувати і удосконалювати систему технологічної підготовки багатомоделного виробництва.

САП ГВС виконує функції автоматизованого технологічного проектування структури і робочих елементів ГВС різного рівня автоматизації. Передбачається інформаційна єдність з системою технологічної підготовки виробництва на рівні експлуатації ГВС. Програмний комплекс САП ГВС базується на формалізації проектних процедур, заснованої на розробленій теорії автоматизації технологічного проектування, яка представляє собою інваріантну частину САП ГВС і є тою системно-утворюючою ланкою, на основі якої створюються пакети прикладних програм функціональних підсистем.

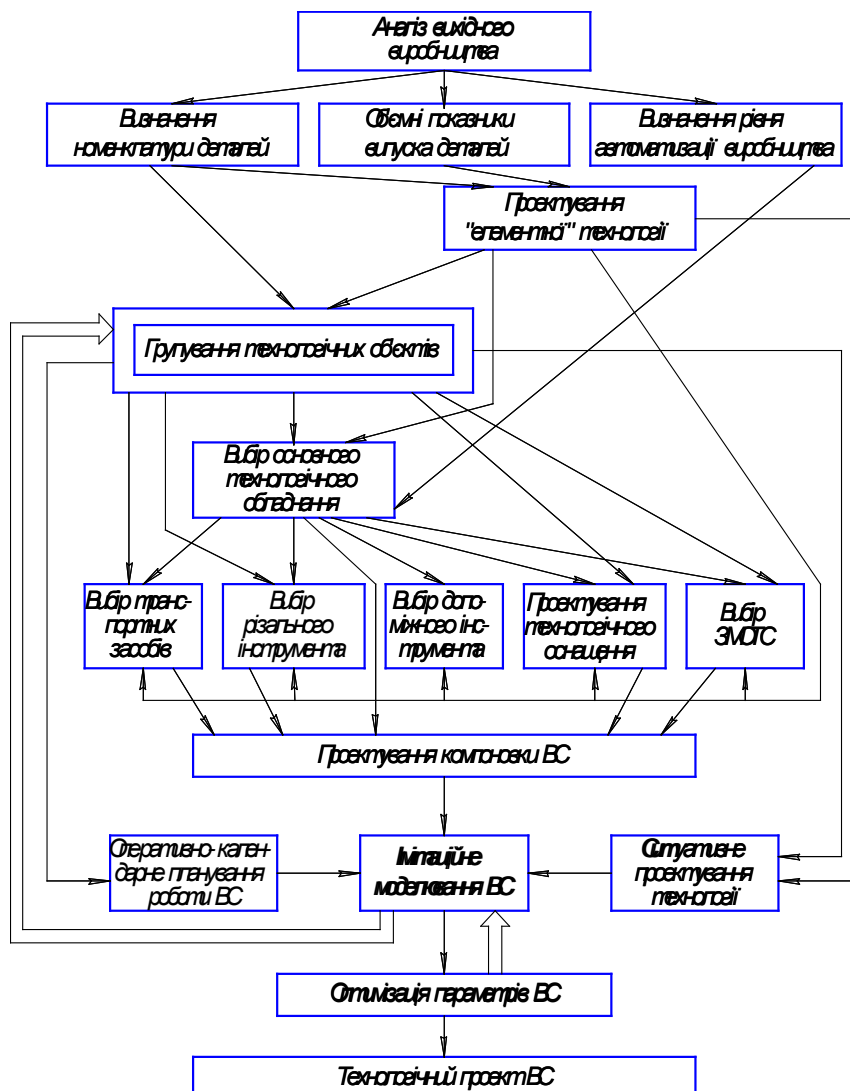


Рис. 1. Схема проектування ГВС багатомоделного виробництва за принципом циклічної стратегії

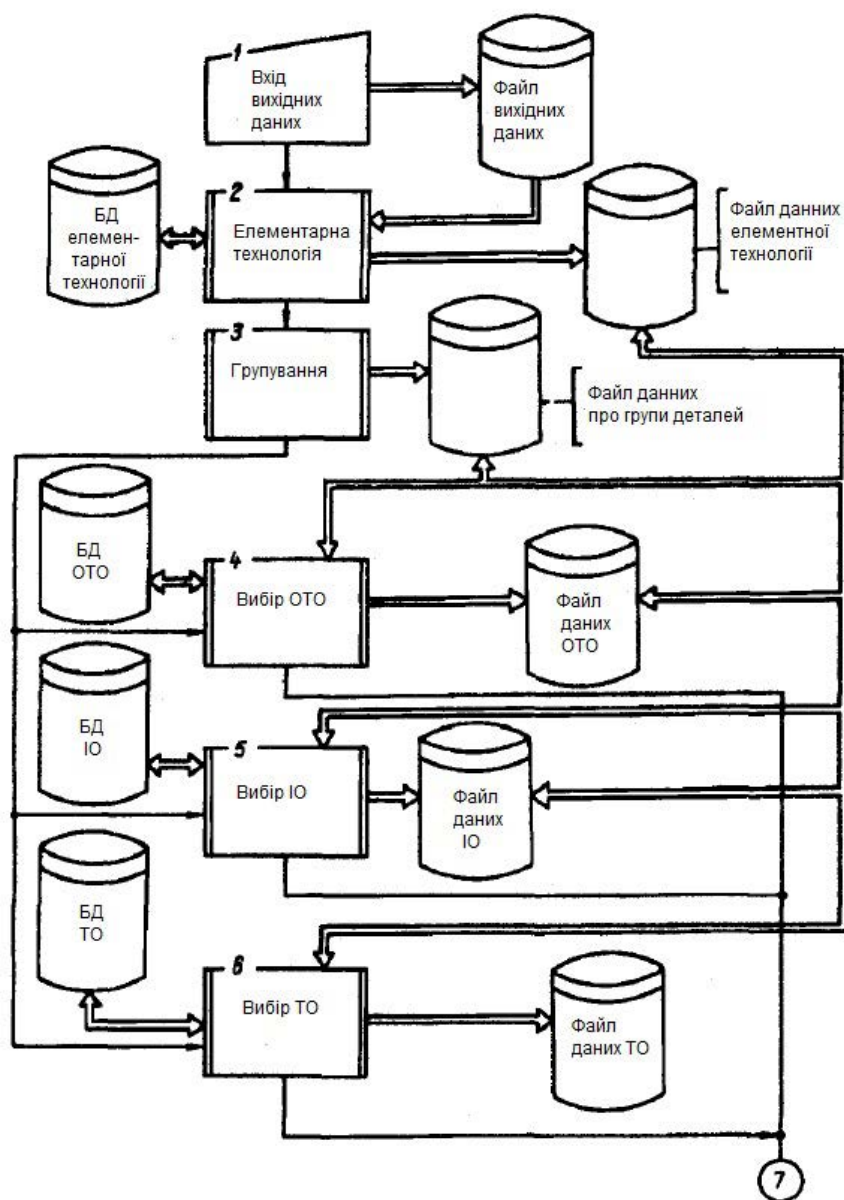


Рис. 2. Загальна структура САП ГВС

Слід зазначити, що циклічна стратегія дозволяє шляхом виконання ітераційних процедур отримати майже оптимальний технологічний проект, який є базою для виконання робочого проекту ГВС.

Головним пу побудові функціональної структури САП ГВС є дослідження інформаційних потоків і зв'язків, які відображають склад і взаємодію окремих підсистем у відповідності до структури задач проектування. При цьому вихідні дані та концепція задачі формуються на вході, а на виході отримуємо проектні рішення. Метод перетворення входу у вихід задається у вигляді математичної моделі. Тут можна задати безліч входів щоб загальна характеристика методу перетворення відповідала класу задач автоматизованого проектування певного типу.

Для ілюстрації процесу координації задач доцільно використовувати трифазні значки (тріади), запозичені з системи структуризації GRISP (Melnikov, Voronenko, 1990).

Функціональна структура (рис. 3) зв'язку завдань і підсистем САП ГВС розроблена на основі структурної декомпозиції завдань проектування ГВС багатоменклатурного виробництва. Процес декомпозиції всієї сукупності завдань завершується на модулі (A1 – A5). Також визначаються зв'язки по інформаційних потоках між модулями та загальні вхід «Вх» і вихід «Вих» (рис. 3).

Структура даних, що використовуються при проектуванні ГВС, дає можливість зробити висновок, що вони можуть бути інтегровані в єдину базу даних САП-ГВС, яка розділяється на системи проектно-орієнтованих і проектно-незалежних даних. У процесі проектування ГВС здійснюється накопичення проміжної інформації окремими підсистемами, яка зберігається у вигляді спеціалізованих файлів змінної інформації інтегрованої бази даних.

Основою функціональної структури САП ГВС є специфіка багатоменклатурного виробництва, що відпо-

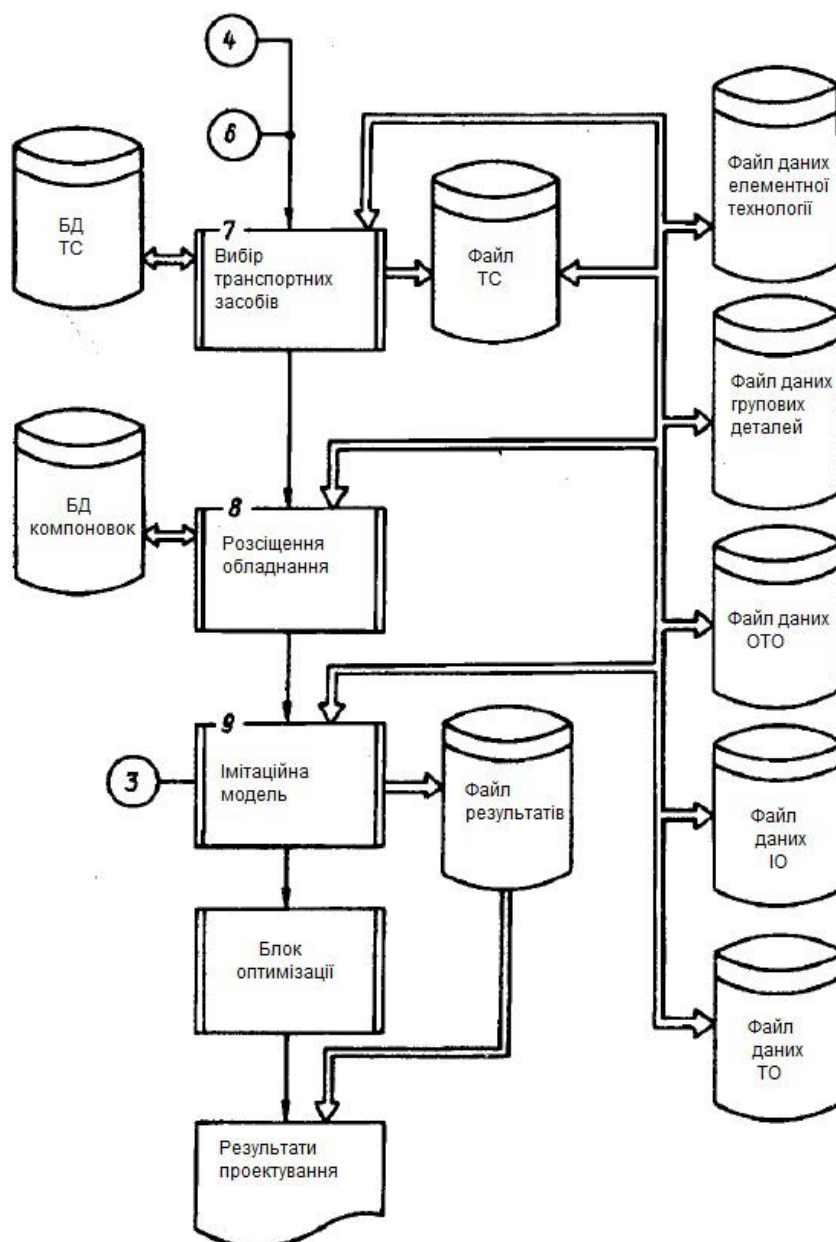


Рис. 2. (Продовження). Загальна структура САП ГВС

відає проблемам уніфікації і стандартизації технологічних об'єктів, використання методів групової технології з урахуванням технологічних властивостей обладнання і оснастки, моделювання та оптимізації проектних рішень (Bazrov, 2001). Функціональна структура САП ГВС побудована з урахуванням логіки взаємодії функціональних підсистем на різних етапах проектування.

Вихідна інформація накопичується в модулі А1 (рис. 3), до складу якого входить САПР «елементної» технології, що поставляє інформацію про тимчасові характеристики технологічних процесів в модулі А2 – А5. Характеристики номенклатури деталей зберігаються також і в модулі А2, в якому формуються групові технологічні рішення, що застосовуються потім в модулях А3 і А4 при проектуванні структури ГВС і засобів технологічного оснащення. Інформація про одержані варіанти ГВС

поступає в модуль А5 симуляції та оптимізації проектних рішень. При одержанні неприйнятних результатів проектування в блоці А2 формуються нові дані про склад груп деталей і процес проектування циклічно повторюється, поки не буде отриманий прийнятний результат з точки зору проектувальника. Проектування ГВС вимагає накопичення проміжної інформації, отриманої окремими підсистемами, яка зберігається у вигляді спеціалізованих файлів змінної інформації інтегрованої бази даних (Avramtchuk, Vavilov, 1988).

Організаційною основою функціональної структури САП ГВС є особливості побудови багатомономенклатурного виробництва, які базуються на уніфікації і стандартизації технологічних об'єктів, застосуванні методів групової технології, прийнятті проектних рішень з урахуванням технологічних властивостей застосовуваного обладнання і оснастки,

моделюванні та оптимізації проектних рішень (Solomentzev, Mitrofanov, Pavlov, Ribakov, 1989). Технологічні властивості групи деталей визначають структурні елементи ГВС і через динамічні характеристики верстатів впливають на експлуатаційні показники ГВС: продуктивність, коефіцієнти завантаження, використання і змінності устаткування, простої устаткування, обсяг незавершеного виробництва і т. п. (Solomentzev, Sosonkin, 1988; Welch, Emang, 1982).

Планово-компонувальні рішення ГВС залежать від типу, матеріалу і габаритних розмірів деталі, а також від маршруту та терміну її обробки. На компоновку ГВС впливають планово-організаційні властивості групи деталей, які в свою чергу визначають порядок розташування верстатів в ГВС, маршрути матеріальних і транспортних потоків, а також об'ємні показники ГВС – кількість основного, транспортного та допоміжного обладнання. Властивості технологічного обладнання дозволяють

при оцінці варіантів структур ГВС виконувати перевірочні проектні процедури по однорідності (гомогенності) верстатного парку системи (ділянки, цеху, заводу). При цьому звертають увагу на властивості масиву верстатного обладнання з урахуванням того, що технологічні характеристики деталей були використані на більш ранніх етапах проектування. Крім того, можуть бути досліджені властивості верстатного, транспортного обладнання, оснащення та інструменту.

Поеднання програмних компонент на єдиній інформаційній базі – основа ефективного впровадження САП ГВС в умовах виробництв різного типу. Тому особливе місце в САП ГВС займає програмне забезпечення, яке представлено сукупністю програмних засобів, необхідних для реалізації функцій автоматизованого проектування і рішення всіх задач функціональних підсистем (Domoradskij, Leskin, Ponomarev, 1986; Avramtchuk, Vavilov, 1988).

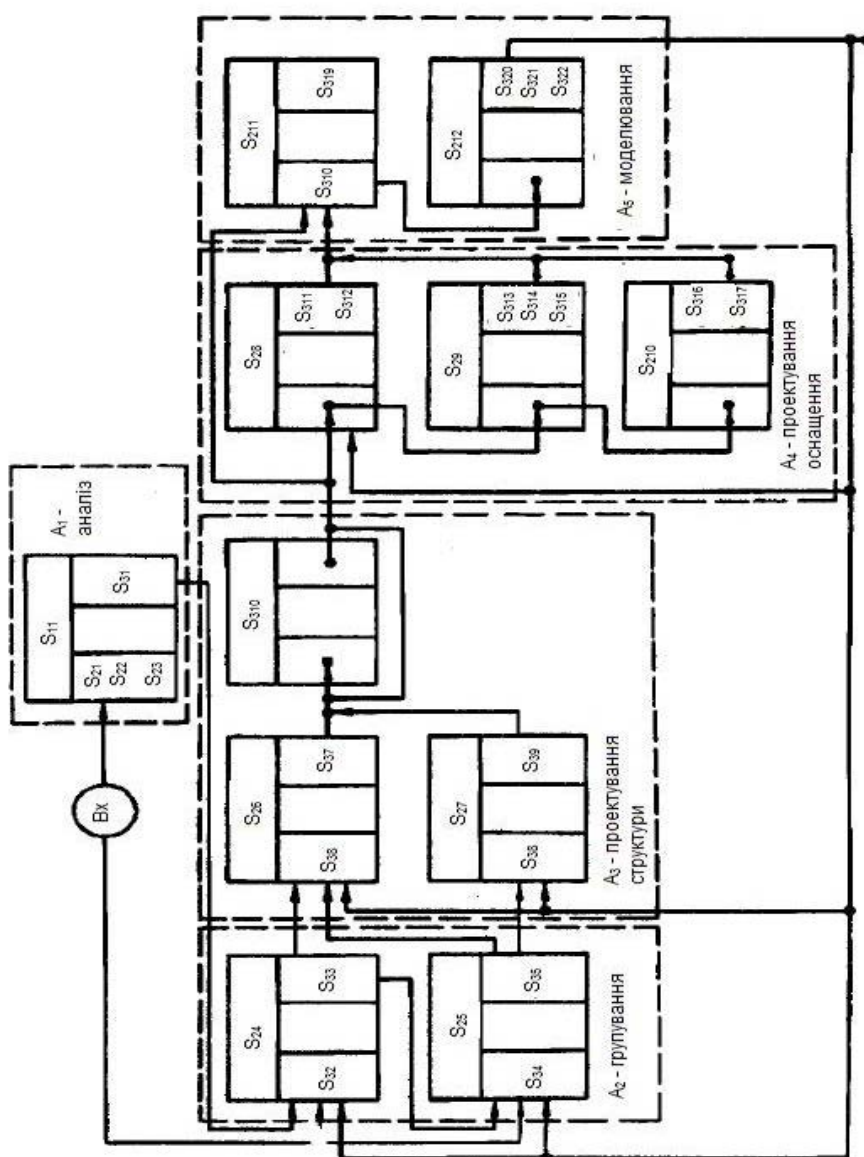


Рис. 3. Функціональна структура взаємозв'язку завдань і підсистем проектування гнучкої системи

Програмне забезпечення САП ГВС складається з програмного комплексу банків даних, який реалізує інтерактивний режим з користувачем і реляційної моделі даних, що забезпечує єдність інформаційної бази засобами опису логічних структур і їх проектування на фізичні файли. Обчислювальні засоби дозволяють автоматизувати процес генерації програмних модулів, наприклад, програмування діалогових процедур. Можливості інструментальних засобів характеризуються рівнем використаного лінгвістичного забезпечення.

Проектні завдання в САП ГВС вирішуються методом реляційної організації баз даних, запропонованим Коддом (Codd, 1970). У цьому методі дані подаються у вигляді незалежного від програмних модулів набору файлів, що дає можливість застосувати набір реляційних процедур обробки інформації. Реляційна база САП ГВС використовує такі принципи: мінімізація структури реквізитів у файлах; комбінація реквізитів не повинна повторюватися в різних файлах бази; пов'язані між собою бази повинні бути фізично поміщені на носіях з урахуванням можливості їх одночасної роботи користувача з базою; логічна структура бази повинна будуватися на єдиному формалізованому поданні до програмної системи, що дозволяє виконувати наступні процедури: логічна вибірка записів з файлу бази; злиття, множення, перетин, з'єднання, різницю, об'єднання, поділ і стиснення баз; вивід підсумків; сортування; групова вибірка.

Логічна структура бази даних технологічного призначення наведена на рис. 4.

Файл «DETAL» містить інформацію про конструкторські дані деталі та її код. Файли «FRM» і «GEO» відображають форму і геометричні взаємозв'язки всіх поверхонь. У файлі «POW» розташовується класифікатор поверхонь, у файлі «PER» – класифікатор переходів. Використовувані при проектуванні оснащення схеми базування записані у файлі «BAZ». Файли «OB», «RI», «II», «WI» містять відомості про обладнання, ріжучий, вимірювальний і допоміжний інструмент. Файл «PRIS» містить дані про базові, настановні і затискні елементи пристосувань. Файли «TS» і «ROB» містять дані про транспортні засоби та промислові роботи. Вихідний файл «GRUP» містить інформацію про номенклатуру деталей, яка розділена на групи, для якої проектується ГВС.

Програмне забезпечення САП ГВС, побудоване на методах структурного програмування, дозволило створення програмних модулів: головного модуля ініціалізації комплексу та ідентифікації користувача; головного монітора; монітора для управління процесів актуалізації, зміни баз даних; редакторів баз даних; програми функціональних підсистем САП ГВС.

Головний модуль видає відеограму – заставку САП ГВС і робить запит відомостей про користувача. Ці відомості перевіряються в довіднику користувачів.

Головний монітор САП ГВС показує основне меню і дає можливість проектувальнику увійти в одну з функціональних підсистем (рис. 5). Монітор для управління процесом актуалізації та зміни баз даних забезпечує можливість роботи з будь-яким файлом бази даних і функціональних підсистем. Редактор розробляється для кожної бази окремо, що викликано специфікою реквізитного складу і логіки пошуку, верифікації і представлення на екрані інформації з файлів.

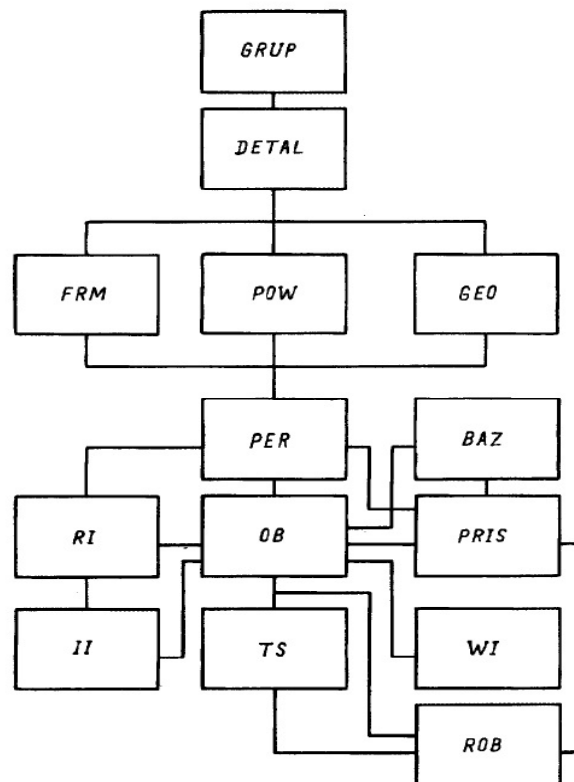


Рис. 4. Логічна структура бази даних



Рис. 5. Структура монітора САП ГВС

Монітор комплексу програмних засобів САП ГВС є автономною підсистемою, пов'язаною з усіма елементами САП ГВС. При допомозі монітора вирішуються в автоматизованому режимі наступні завдання: інсталяція програмного забезпечення САП ГВС; перевірка відповідності версії комплексу на коректність інсталяції; реєстрація користувачів комплексу програм, встановлення паролів і кодів доступу; виклик і взаємозв'язок функціональних підсистем з базою даних технологічного призначення. Використовувані засоби захисту програмних модулів функціональних підсистем, орієнтовані на роботу під керуванням монітора і окремо від нього не працюють.

Функціональне меню системи проводить перевірку можливості виходу на завдання підсистем САП ГВС. Структура монітора САП приведена на рис. 5. Головний модуль PSW. FOX забезпечує захист від несанкціонованого доступу і рівня доступу. Модулі MAIN і MAINMENU перевіряють захист установки САП-ГВС в непереміщуваному файлі PASSWORD. FOX. Модуль INSTAL підключає PROTECT з ключем інсталяції, який в свою чергу створює PASSWORD.FOX. Без ключа PROTECT перевіряє PASSWORD.FOX і створює файл SYS000. Облік і контроль користувачів проводиться в файлі THENAME. DBF.

Монітор САП ГВС забезпечує режим адміністратора системи, який може змінити користувачів та процес інсталяції системи. Завдання в функціональних підсистемах вибирається після натискання клавіші «Введення». Кожна функціональна задача працює під керуванням власного меню.

Експлуатація САП ГВС в умовах конкретного виробництва передбачає актуалізацію інформації в базі даних технологічного призначення. Особливу увагу при цьому необхідно приділити відповідності ключових реквізитів

в різних базах даних. Монітор і функціональні підсистеми САП ГВС працюють в діалоговому режимі.

Програмне забезпечення бази даних забезпечує наступні режими: перегляд, коригування або доповнення полів запису бази даних, упаковка, видалення і пошук по заданому логічному ключу.

При експлуатації САП ГВС база даних технологічного призначення постійно доповнюється і коригується даними про елементи ГВС. Поточний стан бази даних може бути збережений шляхом копіювання підкаталогу DBS. Дані копіюються в розділ з ім'ям ARHddmm, де ARH – приставка найменування архівного розділу, ddmm – дата створення копії в форматі день – місяць. Таким чином можна створити тільки одну копію БД на конкретну дату. При спробі створення копії з уже існуючою датою старі дані будуть загублені. Рекомендується виконувати копіювання бази даних САП ГВС при кожній значній зміні інформації.

Висновки. Розроблена інтегрована система автоматизованого проектування ГВС, яка дозволяє на базі циклічної стратегії проектувати технологічні процеси обробки деталей та синтезувати елементи структури ГВС: основне технологічне обладнання, транспортні засоби, склад систем інструментального та технологічного оснащення. Функціонування такої системи побудовано на використанні величезного обсягу даних про технологію обробки деталей та про засоби виробництва. Тому для роботи САП ГВС повинні бути залучені бази даних та бази знань всієї технології машинобудування та суміжних галузей. Інтегрована система дозволяє автоматизувати безліч проектних процедур, що є вкрай необхідним при створенні сучасного багатомономенклатурного виробництва.

Бібліографічні посилання:

1. Bazrov, B.M. Modulnaja tehnologija v mashinostroenii. [Modular technology in machine-building]. M., Mashinostroenie, 2001. 368 s. [in Russian].
2. Melnikov, G.N., Voronenko V.P. Proektirovanie mekhanosborozhnikov tzezhov. [Design of mechanical assembly shops.]. M., Mashinostroenie, 1990. 352 s. [in Russian].
3. Pukhovskiy, E.S. Proektuvannja tekhnologichnikh protzesiv v umovakh gnuchkogo avtomatizovanogo virobnitstva. [Design of technological processes in conditions of flexible automated production]. Visnik NTUU KPI, Mashinobuduvannja, vip. 59, 2010, s. 267–27. [in Ukrainian].
4. Pukhovskiy, E.S. Problemi grupirovanija detalej pri sozdanii GPS. [Problems of grouping parts when creating GPS]. Visnik NTUU KPI, Mashinobuduvannja, 2009, s.14–20. [in Russian].
5. Domoradskij, A.N., Leskin A.A., Ponomarev V.M. Sistemnoe proektirovanie integrirovanih proizvodstvennikh kompleksov. [Systematically projected integrated proizvodstvennyh complexes]. L. Mashinostroenie, 1986. 319 s. [in Russian].
6. Solomentzev, J.M., Sosonkin V.L. Upravlenie gibkimi proizvodstvennimi sistemami. [Manage flexible production systems]. M., Mashinostroenie, 1988, 352 s. [in Russian].
7. Solomentzev, J.M., Mitrofanov V.G., Pavlov V.V., Ribakov L.V. Informatzionno-vichislitelnie sistemi v mashinostroenii. GALS – tekhnologii. [Information and computing systems in mechanical engineering. GALS – technologies]. M., Nauka, 1989, 292 s. [in Russian].
8. Avramchuk E.F., Vavilov F.F., Emelianov S.V. Tekhnologija sistemnogo modelirovanija. [System Modeling Technology]. M., Mashinostroenie, Berlin, Tekhnik. 1988, 520 s. [in Russian].
9. Codd E.F. A relational model of data for large shared banks. Coom. ACM, 1970, H. 6. p. 377–387.
10. elch A., Emang J.T. Group technology, the heart of flexible manufacturing system. Brighton/ U.K., 1982. okt. p. 121–130.

Pukhovskyy Ye. S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Development of an automated design system for flexible automated production

Design of flexible manufacturing systems (FMS) of modern multi-level production is usually carried out on the basis of general rationing when using large recommendations. At the same time, the specifics and features of a particular production are not always taken into account. In such a design, the most important is the experience of the designer, which

is not always based on modern methods of optimizing project solutions. Therefore, the problem of creating automated design systems in the development of flexible automated productions (FAP), which use cost equipment with numerical control (CNC) is extremely urgent. The development of automated design systems is based on the ideas of a systematic approach that determine different cycles of the process: design – production preparation – production. Information about the projected object is generated in the process of project development by different groups of users: researchers, designers, designers, technologists, production organizers. A multilevel, cyclical design process requires the use of such a volume of information that cannot be processed without the use of modern mathematical methods and calculated equipment. Therefore, it is extremely important to create automated gap design systems, which are marked by greater versatility, efficiency and possibility of development, improvement and adaptation to the conditions of various enterprises. Such requirements served as the basis for the creation of an automated design system, which allows to take into account a huge amount of information in the automatic cycle during the development of the project. The scientific novelty of the work is the development of an integrated automation system for the design of processing technology and the selection of elements of FMS structures. At the same time, information unity with the system of technological training of production at the level of operation of FMS is ensured.

The purpose of the work. Creation of an integrated automated system for the design of technological processes and elements of the structure of flexible automated production on the basis of modern CNC machines, industrial robots and equipment systems.

Key words: Design, automation, machine tool, database, algorithm.

Дата надходження 26.08.2021 р.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ХРОМУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ

Роп'як Любомир Ярославович

доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-9374-2550
L_ropjak@ukr.net

Шовкопляс Максим Володимирович

аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-5302-3623
maks.shovkoplias@gmail.com

Витвицький Василь Степанович

кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-3682-1612
vytvytskyi.v.s@gmail.com

Стрілецький Юрій Йосипович

доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-0105-8306
momental@ukr.net

Проведено аналіз методів хромування для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості змінних деталей гідравлічної частини поршневих насосів: штоків поршнів, надставок штоків, плунжерів і циліндрових втулок. Обґрунтовано переваги застосування електрохімічного хромування деталей в проточному електроліті з нанододатками, яке забезпечує отримання зносостійких покриттів зі стабільними показниками якості поверхні та високими фізико-механічними властивостями. Розроблено систему автоматизованого керування, яка забезпечує підтримання на заданому рівні технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту, а також дозволяє контролювати величину водневого показника електроліту та його електричного опору. Дослідили нанесення на зразки зі сталі 40ХН, які поверхнево гартували та шліфували, хромового покриття із стандартного електроліту з нанододатками. Визначали шорсткість поверхні, товщину і мікротвердість покриття. Хромовані зразки випробовували на зношування під час зворотно-поступального руху. Величину зносу визначали гравіметричним методом. Провели статистичну обробку результатів експерименту із застосуванням кореляційно-регресійного аналізу. Дослідили вплив масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту, густини струму, швидкості потоку електроліту і температури електроліту на величину шорсткості, мікротвердості та зносу покриттів. Побудували регресійні моделі другого порядку, які описують залежності величини шорсткості поверхні, мікротвердості та зносу хромових покриттів від технологічних параметрів процесу. Встановлено, що зростання величини співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку та густини струму призводить до зниження шорсткості, а збільшення температури електроліту спричиняє збільшення шорсткості хромового покриття. Технологічні параметри процесу хромування практично однаково впливають на збільшення величини мікротвердості та зменшення зношування покриття, а введення до складу хромового покриття наноксидів алюмінію призводить до зростання його мікротвердості та відповідно, і зменшення зносу.

Ключові слова: електрохімічне хромове покриття, проточний електроліт, технологічні параметри, довгомірні деталі, автоматизована система керування, шорсткість, мікротвердість, зношування.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.7>

Вступ

Бурові насоси слугують для подачі під високим тиском на вибір свердловини промивальної рідини, яка забезпечує безперервне охолодження, мащення та промивання бурового інструменту, а також винесення на

денну поверхню частинок зруйнованої буровим долотом гірської породи. Найбільшого поширення набули бурові поршневі насоси односторонньої дії, двосторонньої дії та плунжерні насоси, в тому числі штангові свердловинні насоси, в конструкції яких використовують довгомірні

деталі. Деталі бурових насосів і штангових свердловинних насосів: штоки поршнів, надставки штоків, плунжери та циліндрові втулки експлуатуються в середовищі промивальної рідини із великою концентрацією твердих абразивних частинок гірської породи за дії високих тисків і температур та контактують із гумовими ущільненнями під час реверсивного тертя. Такі екстремальні умови експлуатації призводять до інтенсивного корозійно-механічного зношування деталей гідравлічної частини насоса. Для забезпечення під час буріння безперервної подачі промивальної рідини у свердловину в склад циркуляційної системи бурової установки входить два насоси, один із яких робочий, а другий – резервний. На протязі життєвого циклу бурових насосів необхідно періодично здійснювати заміну зношених деталей гідравлічної частини, які мають низький ресурс роботи, а це вимагає значних кількостей запасних частин (змінних деталей).

Серед різноманіття зміцнювальних технологій, що застосовують для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості змінних деталей бурових насосів, найбільшого розповсюдження набули: об'ємне гартування, поверхнєве гартування струмами високої частоти, поверхнєве пластичне деформування кульками та роликами, фрикційне зміцнення та нанесення різних типів зносостійких покриттів. Використання покриттів дозволяє раціонально поєднувати властивості матеріалів: деталь виготовляють із середньовуглецевої конструкційної сталі, а на її робочу поверхню наносять зносостійке покриття. Крім цього, покриття використовують як під час виготовлення нових деталей, так і під час відновлення зношених, що особливо актуально для змінних деталей бурових насосів. Тому дослідження, що спрямовані на розроблення технологічних процесів зміцнення покриттями деталей гідравлічної частини бурових насосів, є актуальними і мають вагомe наукове-практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для підвищення довговічності виробів машинобудування перспективним є застосування функціонально орієнтованих технологій, які забезпечують формування поверхневих шарів з підвищеними фізико-механічними властивостями на робочих поверхнях деталей машин і механізмів. У дослідженні (Vinokurov et al., 2021) розглянуто розподіл електрохімічних покриттів за частотою їх нанесення на поверхні деталей у різних країнах: США, Японія, Італія, Франція, Німеччина, Великобританія, Іспанія, Канада, Мексика, Росія, ПАР. На основі аналізу, металеві покриття можна розташувати в ряд за спадною частотою їх нанесення: $\text{Cr} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Тобто найбільш часто використовують хромові покриття для підвищення зносостійкості деталей двигунів внутрішнього згорання, компресорів, поршневих і плунжерних насосів, гідро- і пневмоприводів, стволів стрілецької та артилерійської зброї тощо.

Автори (Zhang et al., 2013) провели аналіз причин виходу з ладу гідравлічних циліндрів, які є найважливішим компонентом будівельної техніки. Оскільки від якості робочої поверхні штока залежить експлуатаційна надійність і термін служби гідравлічного циліндра, то для підвищення корозійної стійкості та зносостійкості штока

пропонується використовувати гальванічні хромові покриття. Оцінили економічність технології хромування.

Основним конструктивним елементом стрілецької зброї є стволи, в яких внутрішня нарізна поверхня отвору швидко зношується (Ma, 2018), тому потребує захисного покриття. Покриття ствола хромом може ефективно покращити ерозійну стійкість ствола і, таким чином, збільшити термін його служби (Li, 2021).

У праці (Yusron et al., 2020) досліджували хромові покриття, нанесені на середньовуглецеву сталь ASSAB 618S для її захисту від корозії. На основі результатів цього дослідження зробили висновок, що температура електроліту, відстань між електродами впливають на швидкість корозії гальванічного твердого хромового покриття. Дослідження (Jeeva, 2020) присвячені електрохімічному хромуванню, де розглянуто процеси формування покриття та визначено його механічні властивості. Встановлено, що хромові покриття мають сітку мікротріщин, високу мікротвердість, стійкі до корозії та зносу, а також характеризуються низьким коефіцієнтом тертя.

У статті (Galimov et al., 2020) представлено порівняльне дослідження хромових покриттів, отриманих традиційним способом, а також шляхом поєднання процесу гальванічного нанесення покриття з його механічною обробкою. Встановлено, що покриття, отримане гальвано-механічною обробкою (густина струму – 75 A/dm^2 , температура розчину електроліту – 58°C , час нанесення – 45 хв) не має дендритних дефектів. Мікротвердість покриття становить 960...990 HV.

Натепер гальванічні хромові покриття використовуються в промисловості для підвищення корозійної стійкості, стійкості до стирання деталей машин (Vinh et al., 2018; Ngon et al., 2016). Хромування широко використовується під час реставрації зношених деталей (Xia et al., 2018). Однак хромове покриття впливає на втомну міцність деталей машин. Тому гальванічні хромові покриття доцільно використовувати для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості деталей машин, але не для підвищення їх втомної міцності.

Серйозною проблемою є те, що у виробничих процесах хромування використовується шестивалентний хром, який є сильним токсикантом. Тому в останні роки інтенсивно ведуться дослідження, спрямовані на заміну електролітів шестивалентного хрому на тривалентний хром (Danilov et al., 2013; Protsenko et al., 2014; Protsenko et al., 2018). Показано (Bakanov et al., 2017), що для розробки нових технологій електрохімічного нанесення хромових покриттів, необхідно виходити зі складної хімії Cr(III) . Тонкі плівки хрому, а також плівки хрому, леговані кобальтом, отримують з формиат-гліцинового електроліту. Встановлено, що утворені плівки хрому яскраві та мають нанокристалічну структуру, а спільне осаджування хрому та кобальту призводить до утворення більш однорідної структури.

Автор (Katirci, 2016) досліджував вплив сахарину на фізико-хімічні властивості хромового покриття і встановив, що сахарин робить можливим нанесення покриття за низької концентрації іонів Cr^{3+} у тривалентному хромовому електроліті. У дослідженнях (Liang et al., 2017;

Hall et al., 2017) наведено властивості хромових покриттів, нанесених з електроліту Cr(III). Встановлено, що такі хромові покриття мають достатньо високу зносостійкість та корозійну стійкість. У праці (Qi et al., 2020) вивчали формування хромового покриття на алюмінії з електроліту з вмістом іонів тривалентного хрому.

Електрохімічному хромуванню в спокійному електроліті на постійному струмі присвячена велика кількість досліджень, зокрема (Sherwin et al., 2020). Досліджували нанесення твердого хрому (Putri et al., 2019) на елементи імплантанта суглоба з нержавіючої сталі 304, використовуючи метод Тагучі для проведення експерименту та отримання оптимальної товщини покриття. Встановлено, що найбільш значущими факторами для товщини гальванічного покриття є концентрація хромової кислоти та напруга, а найменш впливовим фактором – час.

У праці (Bikulčius et al., 2017) досліджено трибологічні властивості хромових покриттів, нанесених на нержавіючу сталь 316Ti з сульфатних ванн Cr(III) з комплексоутворювачами. Дослідження коефіцієнта тертя під час сухого зношування показали, що хромові покриття, нанесені у ванні Cr(III), мають кращі трибологічні властивості порівняно з покриттями Cr, нанесеними із ванни Cr(VI).

Автори (Addach et al., 2007) провели оптимізацію процесу хромування в спокійному електроліті в імпульсному режимі з використанням центрального композиційного плану. Це дозволило визначити режими за яких досягається найвища мікротвердість покриття до і після старіння та найменша кількість закупореного водню.

Під час нанесення покриттів у спокійному електроліті не забезпечується рівномірне вкриття хромом, оскільки на катоді (деталь) осаджується металевий хром і виділяється водень, а також відновлюється шестивалентний хром до тривалентного, а на аноді – виділяється кисень і тривалентний хром відновлюється до шестивалентного. Тому для забезпечення постачання до поверхні деталі «нового» електроліту та інтенсифікації газовідведення формують хромові покриття у проточному електроліті. В праці (Kagajwala et al., 2013) описана технологія та конструкція електрохімічної комірки для нанесення хромових покриттів на внутрішню поверхню труби в проточному електроліті, який містить тривалентні іони хрому. Дослідники (Ropiak & Ostapovych, 2016) вивчали нанесення хромових покриттів у стандартному проточному електроліті на основі хромового ангідриду та сірчаної кислоти та провели оптимізацію технологічного процесу для забезпечення одержання зносостійких покриттів.

Автори (Belyaev et al., 2016) представили результати досліджень процесу протічного хромування внутрішніх поверхонь довгомірних циліндричних виробів із застосуванням електроліту з ультрадисперсними частинками алмазів із безперервним обертанням деталей. В ході експериментів були обрані такі змінні технологічні параметри: температура електроліту та частота обертання деталі. Встановлено вплив режимів електролізу на пористість, мікротвердість, товщину хромових покриттів та однорідність їх структури.

У праці (Sonntag et al., 2017) проведено випробовування хромових покриттів на металевих деталях шар-

ніра суглоба зі сплаву CoCr, які розробляли для підвищення їх зносостійкості. Як електроліти використовували: (a) промисловий стандартний хромовий електроліт; (b) електроліт шестивалентного хрому Cr(VI) зі зниженим вмістом триоксиду хрому (CrO₃), як без твердих добавок, так і (c) з додаванням наночастинок фулерену (C60); і (d) електроліт тривалентного хрому Cr(III) з додаванням C60. Встановлено, що знос шестивалентних хромових покриттів зменшився на 70–84 % порівняно з еталонним підшипником CoCr-CoCr, тоді як покриття, одержане з тривалентного хрому, навіть збільшило знос більш ніж на 300 %.

У доповіді (Yar-Mukhamedova & Yar-Mukhamedov, 2012) представлені результати дослідження корозійної стійкості наноконпозиційних електролітичних покриттів Cr-SiO₂, нанесених на конструкційну сталь 17Г1С. Випробовування в нафтовому розчині родовища «Жаназол» показали, що найвищу корозійну стійкість має хромове покриття, отримане за температури 333 К.

У праці (Bikulčius et al., 2018) було досліджено отримання композиційних покриттів з металевою матрицею (Cr-ZrO₂) під дією постійного струму та вивчено їх захисні властивості. Композиційне покриття Cr-ZrO₂ наносили з електроліту на основі тривалентного сульфату з комплексоутворювачем, що містив різні концентрації частинок ZrO₂. Результати досліджень показали, що частинки ZrO₂ впливають на мікротвердість, морфологію та корозійну поведінку композиційних покриттів Cr-ZrO₂, отриманих із електроліту Cr(III).

Дослідники (Zeng & Zhang, 2008) наносили аморфні хромово-оксидалюмінієві (α-Cr-Al₂O₃) композиційні електрохімічні покриття товщиною 50 мкм в електроліті Cr(III), що містили тверді частинки Al₂O₃ та Al³⁺. Встановлено, що Al³⁺ сприяє рівномірному розподілу частинок Al₂O₃ в хромових покриттях. Результати демонструють, що введення в електроліт 25 г/л частинок α-Al₂O₃ значно покращує трибологічні характеристики покриттів α-Cr.

Аналіз літературних джерел присвячених електрохімічному хромуванню в проточному електроліті показав, що цей метод дозволяє наносити покриття за більш високих густин струму, і при цьому забезпечити рівномірне нанесення шару покриття з низькою шорсткістю, а також отримати високу швидкість нанесення покриття та підвищений вихід хрому за струмом. Однак наведені у технічній літературі дані не дають можливості цілеспрямовано здійснювати раціональний вибір технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті з нанододатками для формування покриттів з високими експлуатаційними властивостями на циліндричних деталях.

У зв'язку із цим виникає необхідність встановлення впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті з нанододатками на показники якості поверхні та фізико-механічні властивості хромових покриттів.

Цілі та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті з нанододатками на властивості покриттів нанесених на сталеву основу.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- розробити систему автоматизованого керування установкою для електрохімічного хромування в проточному електроліті;
- дослідити вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на шорсткість поверхні та фізико-механічні властивості покриттів.

Матеріали і методи досліджень

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті на експлуатаційні властивості сталевих циліндричних деталей використовували розроблений технологічний процес та установку, яка споряджена системою автоматизованого керування та містить електрохімічну комірку. Зразок під час нанесення хромового покриття встановлюють вертикально в електрохімічній комірці та герметизують.

Розроблена система автоматизованого керування під час проведення електрохімічного хромування робочих поверхонь деталей забезпечує встановлення та вимірювання технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту (хромового ангідриду та сірчаної кислоти), швидкості потоку електроліту в кільцевій протоці між хромованою поверхнею деталі та електродом, густини струму і температури електроліту. Концентрація активних компонентів електроліту для хромування оцінюється непрямим вимірю-

ванням густини електроліту, його електричного опору та водневого показника. Вимірювання швидкості потоку електроліту та його густини здійснюється коріолісовим датчиком. Зовнішній вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування наведено на рис. 1.

Програмне забезпечення дозволяє незалежно контролювати та підтримувати на заданому рівні технологічні параметри процесу електрохімічного хромування, а також за потреби змінювати їх під час електролізу. Максимальна величина струму, яким живиться електрохімічна комірка установки, становить 100 А і підтримується із точністю до 0,01 А. Температура електроліту підтримується вищою за кімнатну і не перевищує 100°C, із точністю 1 °C. Швидкість потоку електроліту вимірюється в межах до 150 см/с, із похибкою не більшою 1 %, а густина – до 1,9 г/см³ із точністю 0,005 г/см³. Підтримання заданих технологічних параметрів здійснюється системою автоматичного керування із використанням пропорційно інтегрованого закону керування.

Як матеріал для виготовлення циліндричних зразків використовували хромонікелеву конструкційну леговану сталь 40ХН (ГОСТ 4543-71), які поверхнево гартували струмами високої частоти. Згідно діючих вимог до стану підготовки поверхні перед нанесенням хромового покриття зразки піддавали шліфуванню ($R_a = 0,32$ мкм). Хромове покриття наносили на зразки зі сталі в стандартному електроліті на основі хромового ангідриду та сірчаної кислоти із нанододатками оксиду алюмінію. Циліндричні аноди – сплав свинець-олово-сурма отримували литвом.

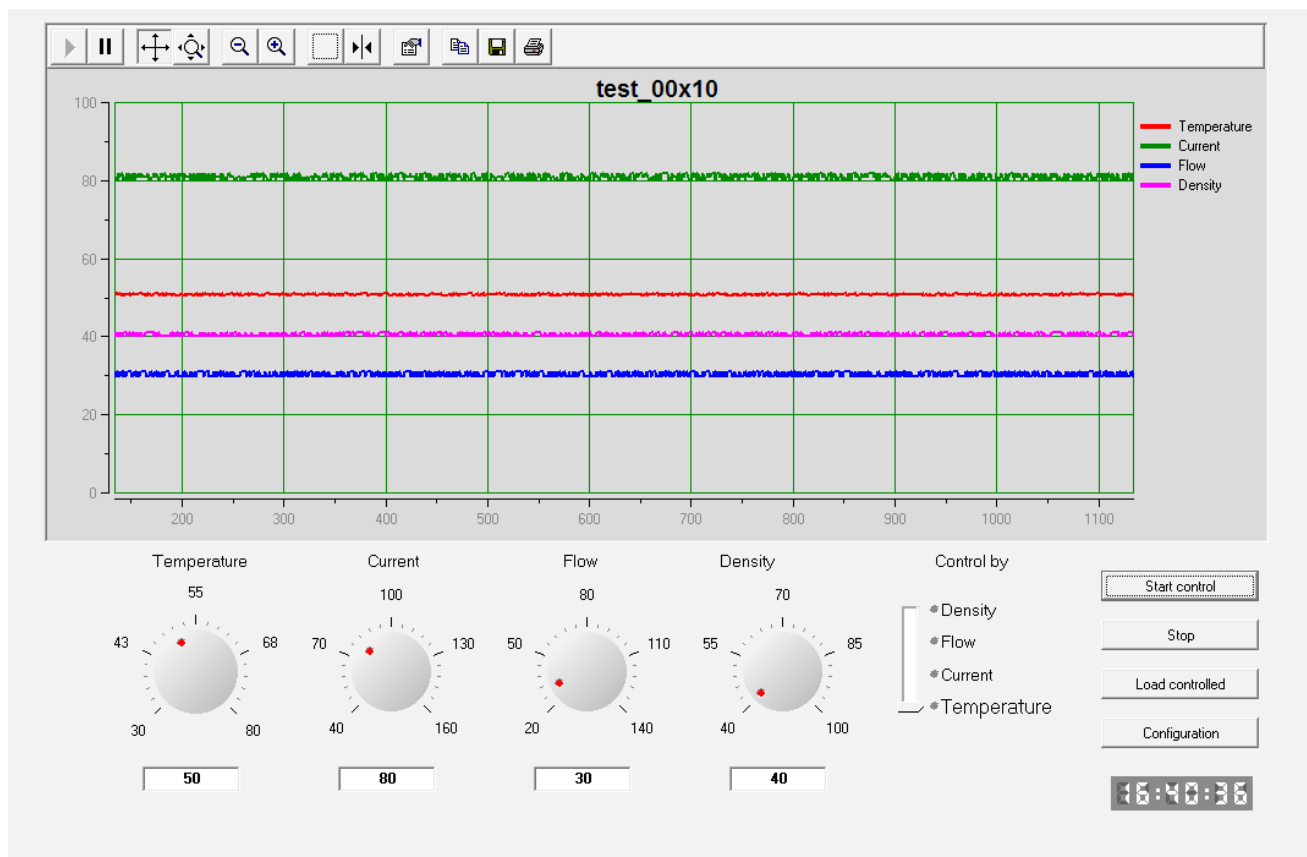


Рис. 1. Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування технологічними параметрами процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

Шорсткість поверхні зразків (R_a) визначали розрахунковим методом на підставі результатів обробки профілограм, знятих на модернізованому приладі профілографі-профілометрі моделі Р-201, відповідно перед нанесенням та після нанесення хромових покриттів.

Для вимірювання товщини і мікротвердості хромових покриттів виготовляли мікрошліфи та використовували прилад ПМТ-3. Товщина шару нанесеного хромового покриття становила від 150 мкм до 170 мкм. Випробовування хромованих зразків на зношування проводили на модернізованій установці для дослідження пар тертя при зворотно-поступальному русі в середовищі промивальної рідини з абразивом, яка відтворює реальні умови роботи під час експлуатації металево-гумових пар тертя насосів: циліндрова втулка – гумово-металевий поршень; шток поршня – гумове ущільнення; плунжер – гумове ущільнення. Величину зносу хромованих зразків визначали гравіметричним методом за допомогою аналітичних терезів ВЛР-200.

Результати досліджень

Під час проведення досліджень електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті з нанододатками, експерименти повторювали тричі з визначенням середніх значень. Для побудови математичних моделей взаємозв'язків залежних змінних із вхідними технологічними параметрами було проведено статистичну обробку результатів експерименту із застосуванням методів кореляційно-регресійного аналізу. На першому етапі кореляційного аналізу підтверджено наявність взаємозв'язків між досліджуваними факторами, а

на другому – за допомогою регресійного аналізу побудовано поліноміальні математичні моделі другого порядку для всіх залежних змінних (технологічних параметрів). Коефіцієнт детермінації R^2 для знайдених рівнянь регресії становив від 0,8402 до 0,9927, при цьому коефіцієнт множинної кореляції R знаходився в межах від 0,9166 до 0,9963. Оскільки значення R^2 більше 0,8, то моделі досить коректно описують відповідні залежності та є придатними для подальших розрахунків характеристик хромових покриттів у залежності від величини технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування сталевих циліндричних деталей у проточному електроліті.

За результатами експериментальних досліджень будували графічні залежності величини шорсткості поверхні (рис. 2), мікротвердості (рис. 3) та зносу (рис. 4) електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті, від технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту. При цьому значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування приймали в діапазонах: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 40\text{--}100$ за постійного вмісту 25 г/л частинок $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, швидкість потоку – $v = 20\text{--}140\text{ см/с}$, густина струму – $i = 40\text{--}160\text{ А/дм}^2$, температура електроліту – $T = 30\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$. Під час побудови відповідних графічних залежностей решта три технологічні параметри приймали на середньому рівні: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 70$, швидкість потоку – $v = 100\text{ см/с}$, густина струму – $i = 85\text{ А/дм}^2$, температура електроліту – $T = 55^\circ\text{C}$.

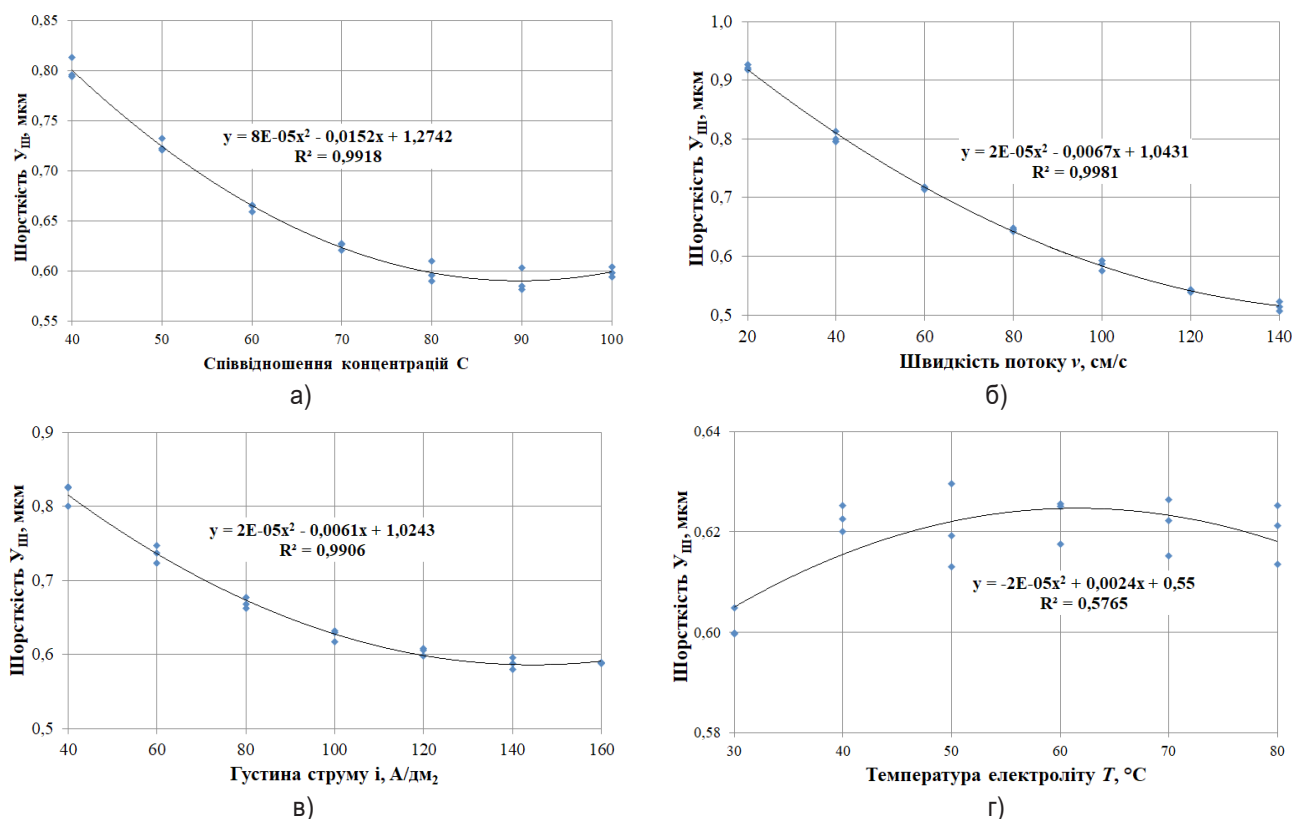


Рис. 2. Залежність шорсткості поверхні покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті: а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту; б – швидкості потоку; в – густини струму; г – температури електроліту

Аналіз впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на величину шорсткості поверхні покриття (рис. 2) показав, що представлена на рис. 2, а крива є вгнутою та має мінімум за співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 90$. Щодо впливу швидкості потоку на шорсткість (рис. 2, б), то отримана крива є спадною у межах досліджуваного діапазону, при цьому досягається мінімальне значення шорсткості покриття на краю, за максимального значень швидкості потоку – $v = 140$ см/с. Отримана крива залежності шорсткості хромового покриття від густини струму (рис. 2, в) є спадною у межах досліджуваного діапазону, а мінімальне значення шорсткості покриття досягається майже на краю, за густини струму близько $i = 145$ А/дм². Залежність шорсткості поверхні хромового покриття від температури електроліту (рис. 2, г) є випуклою кривою, а максимальне значення шорсткості покриття досягається за температури електроліту біля $T = 60^\circ\text{C}$.

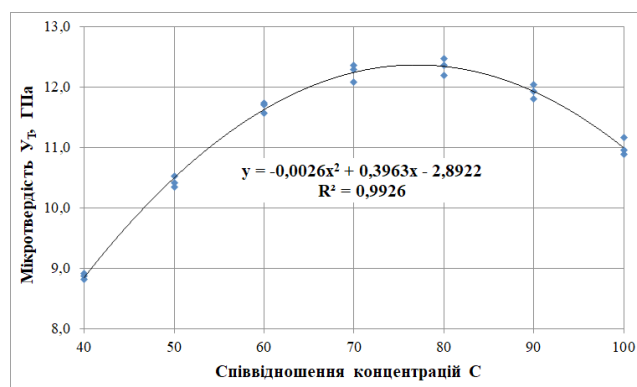
Із аналізу результатів дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на мікротвердість покриття (рис. 3) встановлено, що всі отримані криві є випуклими та мають максимуми в точках відповідно: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 75$, швидкість потоку – $v = 90$ см/с, густина струму – $i = 140$ А/дм², температура електроліту – $T = 57^\circ\text{C}$. За цих значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування у досліджу-

ваних діапазонах забезпечується отримання величини мікротвердості покриття від 11,7 ГПа до 13,1 ГПа. При цьому найбільший вплив на величину мікротвердості чинить густина струму, забезпечуючи формування хромового покриття з великою мікротвердістю – 13,1 ГПа.

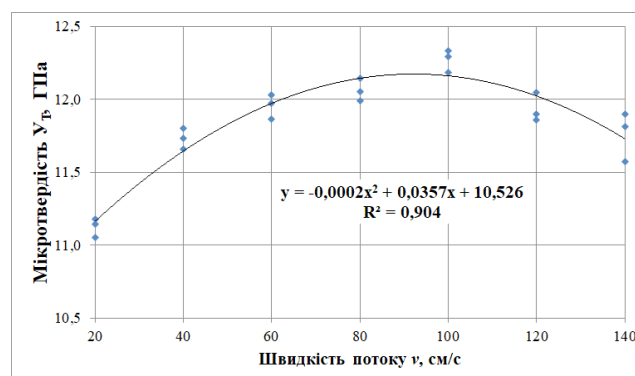
Аналізуючи вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на величину зносу покриття (рис. 4) слід відзначити, що представлені на рис. 4, а, б, в, г криві є вгнутими та мають мінімуми в точках відповідно: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 80$, швидкість потоку – $v = 95$ см/с, густина струму – $i = 150$ А/дм², температура електроліту – $T = 50^\circ\text{C}$. За вищевказаних значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування у досліджуваних діапазонах величина зносу покриття змінюється від 0,095 г до 0,107 г. Встановлено, що найменша величина зносу хромового покриття досягається під час його формування за густини струму – $i = 150$ А/дм².

Обговорення результатів дослідження

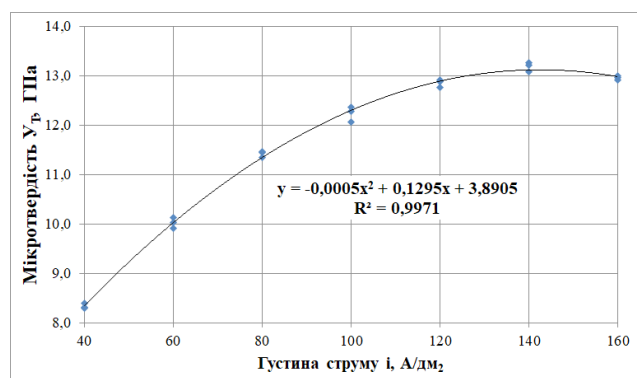
Аналіз графічних залежностей шорсткості поверхні (рис. 2), мікротвердості (рис. 3) та зносу (рис. 4) електрохімічних хромових покриттів нанесених у проточному електроліті від технологічних параметрів процесу, свідчить, що показники якості поверхні та фізико-механічні властивості досліджуваних хромових покриттів залежать практично від усіх технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування: співвідношення концентрацій



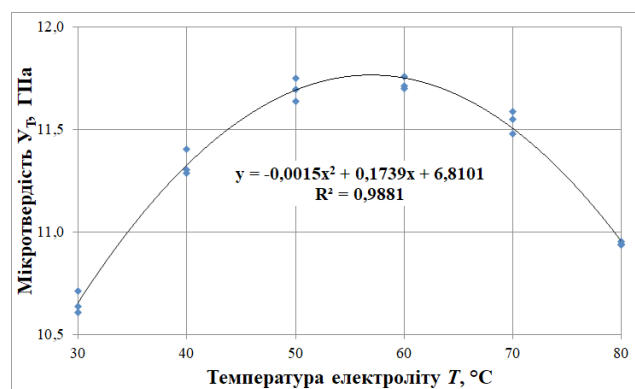
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Залежність мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті: а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту; б – швидкості потоку; в – густини струму; г – температури електроліту

компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму, температури електроліту. Зростання величини співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку та густини струму призводить до зниження шорсткості, а збільшення температури електроліту спричиняє збільшення шорсткості поверхні хромового покриття. Введення до складу хромового покриття наноксидів алюмінію призводить до зростання його мікротвердості, що узгоджується із результатами досліджень з нанесення композиційних електрохімічних покриттів (Yar-Mukhamedova & Yar-Mukhamedov, 2012; Bikulcius et al., 2018; Zeng & Zhang, 2008). Причому збільшення величини мікротвердості хромового покриття практично повною мірою корелює зі зменшенням його зносу.

Слід зазначити, що майже всі отримані криві (рис. 2 – рис. 4) є параболічного типу, і більшість із них має критичні (максимум/мінімум) точки в межах досліджуваних діапазонів зміни технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті. Це свідчить про можливість проведення у подальших дослідженнях оптимізації технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування, які забезпечуватимуть високі експлуатаційні властивості деталей поршневих і плунжерних насосів з хромовими покриттями. Одержані нами результати досліджень узгоджується з результатами представленими в працях (Zhang et al., 2013; Bloch & Geitner, 2019), де описуються приклади зміцнення хро-

муванням відповідно штоків гідроциліндрів і гільз поршневого компресора для забезпечення одержання високої твердості робочої поверхні з низьким коефіцієнтом тертя.

Таким чином, результати досліджень показали можливість цілеспрямованого керування процесом електрохімічного хромування в проточному електроліті задля отримання покриттів із наперед заданими експлуатаційними властивостями, шляхом зміни технологічних параметрів, за допомогою розробленої системи автоматизованого керування. Отримані результати досліджень доцільно використовувати під час розроблення технологічних процесів зміцнення хромовими покриттями деталей поршневих і плунжерних насосів та компресорів тощо.

Висновки

Розроблено систему автоматизованого керування технологічними параметрами процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті, яка забезпечує підтримання на заданому рівні технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту, а також дозволяє контролювати водневий показник електроліту та його електричний опір. На підставі результатів проведених експериментальних досліджень побудовано регресійні моделі другого порядку, які описують залежності величини шорсткості поверхні, мікротвердості та зносу електрохімічних хромових покриттів нанесених в проточному електроліті від

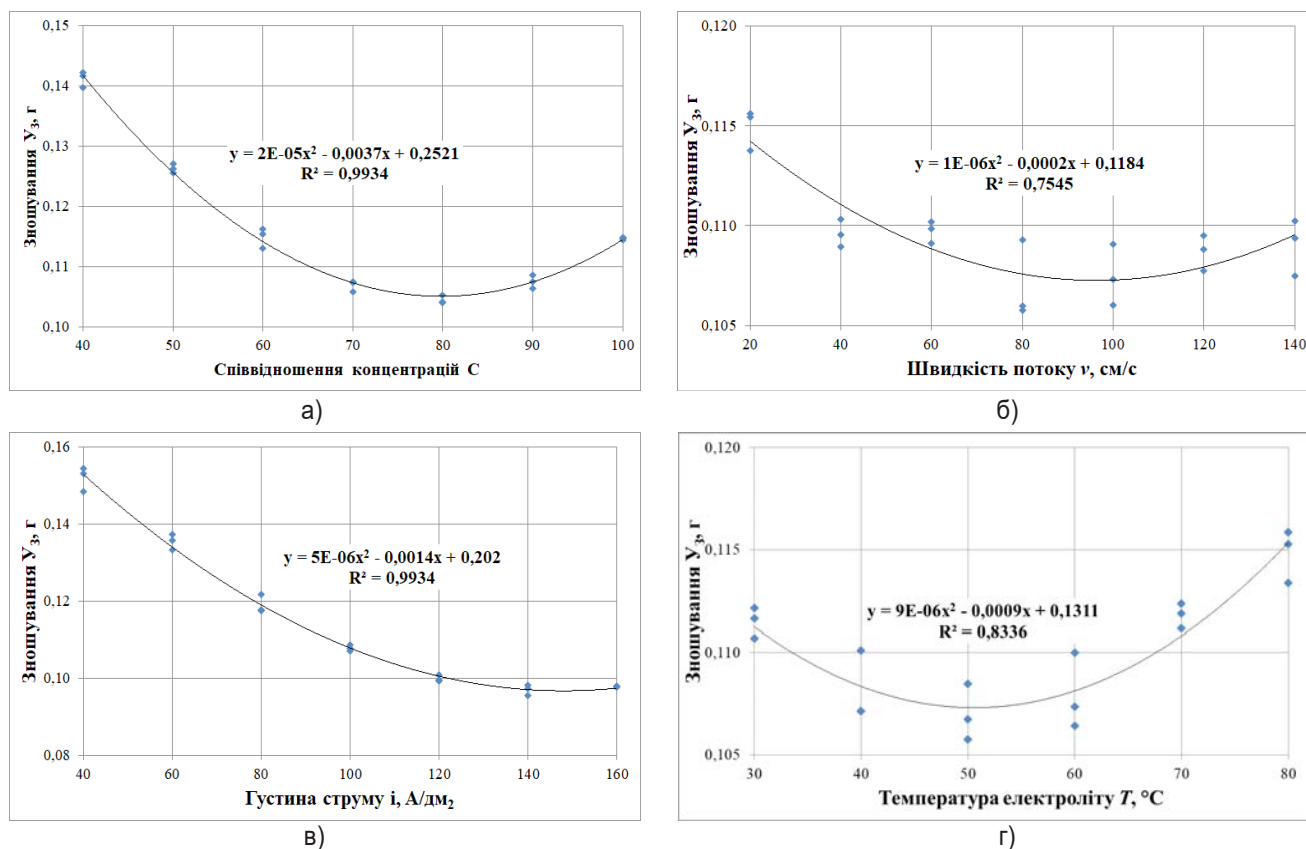


Рис. 4. Залежність величини зносу покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті: а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту; б – швидкості потоку; в – густини струму; г – температури електроліту

режимів технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту. Встановлено, що зростання величини співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку та густини струму призводить до зниження шорсткості, а збільшення температури електроліту спричиняє збільшення шорсткості поверхні хромового покриття. Технологічні параметри процесу електрохімічного хромування практично однаково впливають на збільшення величини мікротвердості та зменшення зношування покриття. Введення до складу хромового покриття наноксидів алюмінію призводить до зростання його мікротвердості та від-

повідно зменшення зносу. Впровадження розробленої технології у виробництво дозволить підвищити ресурс роботи швидкозношуваних деталей машин.

У подальших дослідженнях планується провести оптимізацію технологічного процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті з нанододатками.

Подяки. Дослідження проводилося в рамках проекту «Розробка екологічно чистої технології хромування в проточному електроліті довгомірних деталей зі складною топологією поверхні», Д-8-21-П (ПК 0121U109591), 2021–2022 р.р., що фінансується Міністерством освіти і науки України за рахунок видатків загального фонду державного бюджету.

Бібліографічні посилання:

1. Vinokurov, E.G., Burukhina, T.F., & Kuroshev, I.S. (2021). Ranking of metallic and non-metallic coatings in the electrochemical surface treatment sector. *Tsvetnye Metally*, 2021 (4), 54–58. ULR: <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.04.09>.
2. Zhang, N., Huang, C. H., Zhang, C. H., & Shi, N. (2013). Anticorrosion Property Study on the Hard Chrome Plating Layer of Hydraulic Cylinder Rod. *Advanced Materials Research*, 791–793, 394–397. Trans Tech Publications, Ltd. ULR: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.791-793.394>.
3. Ma, J.-s. (2018). The law of barrel wear and its application. *Defence Technology*, 14 (6), 674–676. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.012>.
4. Li, X.-I., Zang, Y., Lian, Y., Ma, M.-yu., Mu, L., & Qin, Q. (2021). An interface shear damage model of chromium coating/steel substrate under thermal erosion load. *Defence Technology*, 17(2), 405–415. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.002>.
5. Yusron, R.M., Bisoño, R.M., & Pramudia, M. (2020). Effect Electrolyte Temperature and Electrode Distance to Electroplating Hard-Chrome on Medium-Carbon Steel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569 (4), art. no. 042007. ULR: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042007>.
6. Jeeva, P.A. (2020). A review on electrodeposition of hard chrome plating. *Journal of Corrosion Science and Engineering*, 23, art. no. 41, 1–12.
7. Galimov, D.M., Ardashev, D.V., & Dyakonov, A.A. (2020). Morphology and properties of solid chrome plating, obtained by the galvanomechanical method. *Solid State Phenomena*, 299 SSP, 872–878. ULR: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.872>.
8. Vinh, P.N., Thien, N.D., Le & Chi, C. (2018). Study the Effect of Chrome Coating Thickness to Fatigue Strength of the Axle-Shaped Machine Parts. *Proceedings 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*, GTSD 2018, art. no. 8595550, 221–226. ULR: <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595550>.
9. Ngon, D.T., Cuong, L.C., & Phoi, N.V. (2016). Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts. *Proceedings – 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development*, GTSD 2016, art. no. 7796635, 135–140. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2016.40>.
10. Xia, H., Shen, X.M., Yang, X.C., Xiong, Y., & Jiang, G.L. (2018). Influences of the current density on the performances of the chrome-plated layer in deterministic electroplating repair. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 292 (1), art. no. 012075. ULR: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/292/1/012075>.
11. Danilov, F.I., Protsenko, V.S., Gordienko, V.O., Baskevich, A.S., & Artemchuk, V.V. (2013). Electroplating of wear-resistant nanocrystalline coatings from a bath containing basic chromium (III) sulfate (chrome tanning agent). *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 49 (3), 299–303. ULR: <https://doi.org/10.1134/S2070205113030076>.
12. Protsenko, V.S., & Danilov, F.I. (2014). Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: Comparative study on advantages and disadvantages. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16 (6), 1201–1206. ULR: <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0711-1>.
13. Protsenko, V.S., Bobrova, L.S., Baskevich, A.S., Korniy, S.A., & Danilov, F.I. (2018). Electrodeposition of chromium coatings from a choline chloride based ionic liquid with the addition of water. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 53 (5), 906–915.
14. Bakanov, V.I., Nesterova, N.V., & Yakupov, A.A. (2017). Features of electroplating of nanocrystalline chromium coatings from electrolytes based on Cr(III). *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53 (3), 426–432. ULR: <https://doi.org/10.1134/S2070205117030054>.
15. Katirci, R. (2016). A chrome coating from a trivalent chromium bath containing extremely low concentration of Cr³⁺ ions. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 10(1), 73–85. ULR: <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2016.075318>.
16. Liang, A., Li, Y., Liang, H., Ni, L., & Zhang, J. (2017). A favorable chromium coating electrodeposited from Cr(III) electrolyte reveals anti-wear performance similar to conventional hard chromium. *Materials Letters*, 189, 221–224. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.12.022>.
17. Hall, T.D., Snyder, S.T., Taylor, E.J., Inman, M.E., Xu, J., & Radhakrishnan, R. (2017). Development of a Functional Reach Compliant Trivalent Chromium Electroplating Process. *ECS – 2017 The Electrochemical Society, ECS Meeting Abstracts, E01-Green Electrodeposition*, 4, MA2017-01, art. no. 1045. ULR: <https://doi.org/10.1149/MA2017-01/18/1045>.
18. Qi, J., Swiatowska, J., Skeldon, P., & Marcus, P. (2020). Chromium valence change in trivalent chromium conversion coatings on aluminium deposited under applied potentials. *Corrosion Science*, 167, art. no. 108482. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108482>.
19. Sherwin, C., Bhat, S., & Hebbar, S. P. (2020). A brief review on nickel and chromium coatings developed by electrochemical route. *AIP Conference Proceedings*, 2236 (1), art. no. 040007. ULR: <https://doi.org/10.1063/5.0006832>.

20. Putri, S., Pujiyanto, E., & Triyono, J. (2019). Optimization of Electroplating Thickness Quality at Hip Joint Implant Using the Taguchi Method. *Jurnal Teknik Industri*, 20(1), 45–52. ULR: <https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol20.No1.45-52>.
21. Bikulčius, G., Češūnienė, A., Selskienė, A., Pakštas, V., & Matijošius, T. (2017). Dry sliding tribological behavior of Cr coatings electrodeposited in trivalent chromium sulphate baths. *Surface and Coatings Technology*, 315, 130–138. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.076>.
22. Addach, H., Berçot, P., Rezrazi, M., Petris-Wery, M. De., & Ayedi, H. F. (2007) Application of statistical design to optimisation of hardness and hydrogen content of chromium coating under pulse reverse electroplating, *Transactions of the Institute of Metal Finishing. The International Journal of Surface Engineering and Coatings*, 85(4), 187–193. ULR: <https://doi.org/10.1179/174591907X216422>.
23. Kagajwala, B., Hall, T.D., Inman, M., Taylor, E.J., Griffin, B., Cushnie, G., Taylor, R., Jaworowski, M., & Bonivel, J. (2013). Functional Trivalent Chromium Electroplating of Internal Diameters. *Products Finishing*, 1/2/2013. Digital Edition. ULR: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>.
24. Ropiak L. Ia. & Ostapovych V. V. (2016). Optymizatsiia tekhnolohichnykh parametriv protsesu khromuvannia dlia zabezpechennia pokaznykiv yakosti detalei porshnevnykh nasosiv. *Skhidno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*, 2 (5 (80), 50–62. (in Ukrainian). ULR: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65719>.
25. Belyaev, V. N., Koslyuk, A. Yu, Lobunets, A. V., & Andreyev, A. S. (2016). Quality Improvement of Chrome-Diamond Coatings on Flowing Chrome Plating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 126 (1), art. no. 012002. ULR: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012002>.
26. Sonntag, R., Feige, K., dos Santos, C.B., & Kretzer, J.P. (2017). Hard chrome-coated and fullerene-doped metal surfaces in orthopedic bearings. *Materials*, 10 (12), art. no. 1449. ULR: <https://doi.org/10.3390/ma10121449>.
27. Yar-Mukhamedova, G., & Yar-Mukhamedov, E. (2012). Investigation of corrosion resistance of chrome based nano-composition coatings in the conditions of oil production. *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO – Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection*, SGEM 2012, 3, 475–479.
28. Bikulčius, G., Češūnienė, A., Selskienė, A., Griguševičienė, A., Jasulaitienė, V., & Ger, M. (2018). Characterization of Cr–ZrO₂ composite coatings electrodeposited from Cr(III) bath. *Chemija*, 29 (2), 97–108. ULR: <https://doi.org/10.6001/chemija.v29i2.3712>.
29. Zeng, Z., & Zhang, J. (2008). Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(12), 2725–2730. ULR: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.008>.
30. Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2019). Chapter 10 – Protecting machinery parts against the loss of surface. Editor(s): Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner. In *Practical Machinery Management for Process Plants. Machinery Component Maintenance and Repair (Fourth Edition)*. Gulf Professional Publishing, 2019, 551–633. ULR: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818729-6.00010-1>.

Ropyak L. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Shovkoplias M. V., Postgraduate, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Vytvytskyi V. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ukraine

Striletskyi Y. Y., Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Influence of technological parameters the electrochemical chromiation process on the operational properties of coatings

The analysis of chrome plating methods to increase the wear-resistance and corrosion resistance of replaceable parts of the hydraulic part of piston pumps: piston rods, rod extensions, plungers and cylinder bushings. Reasoned the advantages of using electrochemical chrome plating of parts in a flowing electrolyte with nanoadditives, which provides wear-resistant coatings with stable surface quality indicators and high physical and mechanical properties. An automated control system has been developed which provides maintain at a given level the technological parameters of the electrochemical chromium plating process in a flowing electrolyte: the ratio of concentrations of electrolyte components, flow rate, current density and electrolyte temperature, and also allows to control the value of the water index of the electrolyte and its electrical resistance. The application of a chromium coating of a standard electrolyte with nanoadditives on the 40HN steel samples, which were surface hardened and ground, have investigated. Surface roughness, thickness and microhardness of coating were determined. Chrome-plated samples were tested for wear during reciprocating motion. The value of wearing was determined by gravimetric method. Statistical results of the experiment were performed using correlation-regression analysis. The effect of mass ratio of concentrations of electrolyte components, current density, electrolyte flow rate and electrolyte temperature on the value of roughness, microhardness and wear of coatings was investigated. Second-order regression models that describe the dependences of the surface roughness, microhardness and wear of chrome coatings on the technological parameters of the process was constructed. Increasing a ratio of the concentrations of the electrolyte components, flow rate and current density leads to a decrease in roughness, and an increase in the electrolyte temperature causes an increase in the roughness of the chromium coating was established. Technological parameters of the chromium plating process have almost the same effect on increasing the microhardness and reducing the wear of the coating, and the introduction of aluminum nanooxides in the chromium coating leads to an increase in its microhardness and, accordingly, reduce wear.

Key words: electrochemical chrome coating, flowing electrolyte, technological parameters, long details, automated control system, roughness, microhardness, wear.

Дата надходження 24.11.2022 р.

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА – ДІЄВИЙ ТА ЗРУЧНИЙ СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ

Юрченко Олександр Юрійович

асистент

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0002-3047-6654

aleksyurchenko110917@gmail.com

Барсукова Ганна Володимирівна

кандидат технічних наук, ст. викладач

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0002-4261-2182

Anna-Barsukova@ukr.net

У статті розглянуто систему, що дає можливість автоматизованого керування роботою насосного агрегату за різних режимів роботи. Системою забезпечуються ручний та автоматичний режими керування, що дає змогу переважно за автоматичного режиму керування виключити відсоток відмов через людський фактор. Робота системи базується головним чином на використанні перетворювача частоти, що є основним елементом у системі, яка розглядається, та допоміжних структурних елементів, таких як реле захисту від «сухого ходу», реле для захисту від перепаду тиску в основному та резервному насосах, датчики температури та тиску.

Потреба у постійній високоточній зміні швидкості обертання насосного агрегату здатна бути вирішена за рахунок такої системи, принцип роботи якої полягає у надходженні періодичних, коли це необхідно буде здійснювати, сигналів до перетворювача частоти, який залежно від того, яку швидкість обертання насосного агрегату потрібно досягти, буде регулювати частоту, яка безпосередньо має вплив на швидкість обертання електричного двигуна, що є приводним двигуном для насосного агрегату. У разі наприклад зменшення тиску води у системі через датчики температури та реле перепаду тиску буде подано сигнал до частотного перетворювача, яким буде збільшено частоту електромагнітного поля. За рахунок збільшення частоти і при цьому незмінного числа пар полюсів у електричному двигуні буде досягнуто більшу швидкість обертання електродвигуна, що призведе до збільшення продуктивності насосного агрегату, яким накачується певна кількість рідини, тиск якої заздалегідь визначений та запрограмований як стандартне значення тиску у системі. Збільшивши частоту, а відповідно, і продуктивність насосного агрегату, тиск у системі буде піднято до стандартного значення, після чого насосний агрегат буде здійснювати роботу на звичній для себе швидкості.

Таким чином, будь-які відхилення параметрів системи від робочих є контрольованими та регулюються за рахунок датчиків та реле температури, а також перетворювача частоти, який за рахунок зміни частоти здійснює зміну швидкості обертання і, як наслідок, зміну продуктивності роботи насосного агрегату, що може бути використаний у системах тепло- або водопостачання як житлових будинків, так і промислових підприємств окремо взятих груп споживачів.

Ключові слова: насос, частота, струм, обертання, продуктивність, тиск, залежність.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.8>

Вступ (Introduction). Наносні агрегати через свою поширеність у системах водо- та теплопостачання мають відповідати всім необхідним вимогам для задоволення потреб споживачів.

Нерідко питання водопостачання зводиться до використання багатофункціональної системи, яка повинна здійснювати безперебійне перекачування рідини, підтримання рівня рідини на конкретному визначеному рівні, сигналізувати про будь-які відхилення від нормованих або запрограмованих значень, що відбуваються у системі, і т. п.

Одним з основних завдань насосних агрегатів, що працюють у системі теплопостачання, наприклад суспільних приміщень, є перекачування води, яка є теплоносієм, зі змінною швидкістю. Це пов'язане з перепадом температури навколишнього середовища, а відповідно, і приміщення, надмірним виділенням парів тощо. У зв'язку із цим виникає потреба в безперебійному автоматизованому режимі керування процесом роботи насосного агрегату,

що міг би забезпечити всі вище перераховані функціональні можливості та здатність працювати в автоматизованому режимі, тобто без втручання оператора.

Регулювання продуктивності насосних агрегатів можна здійснювати різними способами.

Забезпечення необхідного гідравлічного режиму у циркуляційних системах регулюванням насосу призводить до додаткової втрати енергії на регулювання. Однак це відбувається за винятком способу частотних регулювань, що дозволяє забезпечити режим роботи насосу із найбільшими ККД (Novosti teplosnabzheniya, 2014).

Таким чином, у джерелі 1 (Novosti teplosnabzheniya, 2014) регулювання частотним перетворювачем представлено як найбільш енергетично ефективний спосіб регулювання насосу за змінних витрат води у приєднаних системах. У роботі встановлено, що за постійних витрат води економічно доцільними є більш точні узгодження гідравлічних характеристик насосу і приєднаних мереж,

які виробляються за рахунок підбору насосів, обточування робочих коліс або проведення налагоджувальних заходів у мережах.

За результатами аналізу кількох розглянутих способів регулювання у джерелі 2 (Kolpakchian, Lavronova, 2011) вибрано найефективніший з погляду зниження витрат електроенергії. Для прикладу у роботі виконано розрахунок добових енергоспоживань насосною станцією із трьома насосними агрегатами за різних способів регулювання. За результатами розрахунків здійснено побудову графіків залежності споживаної насосними агрегатами потужності та визначено найефективніший спосіб керування.

Аналіз отриманих результатів показав, що зі збільшенням статичного складника у гідравлічному опорі магістралі відбувається зниження ефективності регулювання продуктивності насосу шляхом зміни частоти обертання. Порівняння витрат електроенергії за регулювання частоти обертання всіх насосних агрегатів і одного насосного агрегату у разі підключення інших до мережі безпосередньо показало, що обидва зі способів мають приблизно рівну енергетичну ефективність. Тому для створення пристрою керування групою насосних агрегатів є можливість застосування одного із перетворювачів замість декількох, що суттєво знизить вартість системи.

Способи регулювання насосів хоч і здатні знизити витрату електричної енергії, але не можуть забезпечити ефективного регулювання. Встановлено, що порівняно більша ефективність забезпечується регулюванням, яке ґрунтується на зміні частоти обертання робочих коліс насосів (Urishev, Beitullaeva, Gayimnazarov, Umirov, 2015).

Один із таких способів, що заснований на зміні частоти обертання робочих коліс насосного агрегату, розглянуто в джерелі 3 (Urishev, Beitullaeva, Gayimnazarov, Umirov, 2015). Така система дає змогу за відхилень технологічного параметра (наприклад, витрат води у напірному трубопроводі) від оптимальних значень, запрограмованих для конкретно визначеної системи, додатково формувати сигнали щодо підвищення або зниження частоти обертання електричного двигуна для того, щоб підтримувати необхідне значення технологічного параметру, яке потрібне для того, щоб мати більш високі значення ККД насосного агрегату.

У роботі 4 (Mirmarine, 2021) проаналізовано регулювання насосних агрегатів за такими способами:

- за сталим тиском;
- за сталою температурою;
- регулювання за постійним перепадом тиску циркуляційної системи;
- пропорційним регулюванням напору.

У роботі розглянуто переваги та недоліки кожного з методів регулювання та визначено, що найбільш ефективним є регулювання за допомогою частотного перетворювача.

Для керування асинхронним двигуном можливе векторне управління. Цей спосіб дає змогу збільшити точність частотного регулювання та застосовується там, де є необхідність підтримання моменту двигуна у разі низьких швидкостей обертання та забезпечити стабілізацію швидкостей у разі стрибків навантажень (Ke, 2016).

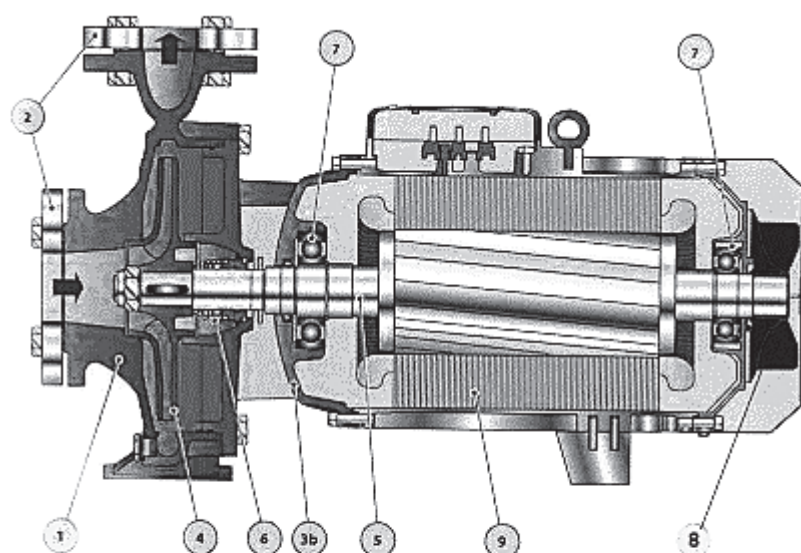
У роботах 6 та 7 (Araujo, Ramos, & Coelho, 2006; Piratla, & Ariaratnam, 2011) представлено причини виникнення у трубопроводах втрат рідини через нестабільність тиску води у системі. Оцінку динаміки роботи системи водопостачання можна проводити, використовуючи математичні моделі, що можуть бути як лінійними (Price, & Ostfeld, 2012), так і нелінійними (Price & Ostfeld, 2013) чи стохастичними (Schwartz, Housh, & Ostfeld, 2016).

Крім того, керований за частотою електричний двигун має певні особливості, серед яких – час намагнічування та розмагнічування двигуна (Volkov, 2018). У разі відключень електродвигуна вентиляторної або насосної установок можливе обертання ротора та робочого колеса приводного механізму в напрямку, протилежному напрямку обертання в робочому режимі (Shabanov, Pashkin, Ivashkin, 2019). Тому використання частотних перетворювачів є досить актуальним нині. Проте, крім переваг векторного керування асинхронним двигуном, цей спосіб частотного керування має значний недолік, що пов'язаний із високими вимогами до обчислювального пристрою, який його реалізує (Korshunov, Khomyak, Vasilyeva, 2020). Тому показники електроприводів із періодичними навантаженнями оцінюються за допомогою циклічного ККД, що визначається за окремо взятий період одного циклу із зміни навантаження. Періоди роботи двигунів з періодичними навантаженнями зі значними величинами пускового та максимального моментів у режимі недовантаження призводять до зниження енергоефективності (Bibik, 2019). З цього приводу у роботі (Bibik, Mazurenko, Shikhnenko, 2019) запропоновано алгоритм із зміни напруги живлення та кутів комутації, що забезпечить максимальні значення ККД за зміни частот обертання. В роботі (Anikin, Burkovsky, Mukonin, Tonn, Trubetsko, 2021) у разі реалізації закону частотного керування зі стабілізацією кута між струмом обмотки статора та струмозачепленням обмотки ротора видається можливою розробка засобів системи керування. А у разі аналізу методів керування у роботі (Ivanov, Sitas, Richter, 2015) виявлено доцільність використання гідродинамічного способу регулювання продуктивності. Цей же спосіб, а також частотно-регульованих приводів розглянуто у порівняльному аналізі ефективності альтернативних способів регулювання продуктивності насосних агрегатів у роботах (Sitas, Peshk, Richter, 2005; Ivanov, Richter, Sitas V, 2012; Alas, Noulette, 2013).

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Автоматизація будь-якого технічного процесу має на меті зменшення затрат праці робітником, скорочення витрат часу на здійснення того чи іншого процесу та безпосередньо покращення протікання такого процесу. У зв'язку із цим слід розглянути схему автоматизованої системи керування роботою насосного агрегату та обґрунтувати параметри, що є фундаментальними та підлягають контролю.

Матеріали і методи досліджень (Materials and Methods). Будь-який насосний агрегат має у своєму складі основні структурні частини.

Потреба в регулюванні насосного агрегату, а саме його продуктивності, за рахунок зміни швидкості



- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Корпус насоса | 6. Уплотнение вала |
| 2. Ответные фланцы трубопроводов | 7. Подшипники качения |
| 3. Корпус электродвигателя | 8. Крыльчатка охлаждения мотора |
| 4. Рабочее колесо | 9. Статор |
| 5. Вал электродвигателя | |

Рис. 1. Будова насосного агрегату:

- 1 – корпус насосу; 2 – фланці трубопроводу;
 3 – корпус електродвигуна; 4 – робоче колесо;
 5 – вал електродвигуна; 6 – ущільнення валу; 7 – підшипники;
 8 – крильчатка охолодження електродвигуна; 9 – статор

обертання має на меті регулювання саме за рахунок внесення змін у коло керування електродвигуном.

Внесення змін саме у насосний агрегат насамперед веде за собою зміну конструкції насосного агрегату, що може відобразитися на термінах роботи агрегату, які заявлені заводом-виробником такого технологічного обладнання.

Тому внесення змін безпосередньо у коло керування є найбільш ефективним та оптимальним способом регулювання.

У ході дослідження передбачено аналіз роботи системи, що включає у себе:

- основний насос;
- резервний насос;
- частотний перетворювач;
- реле захисту від сухого ходу;
- реле для захисту від перепаду тиску в основному насосі;
- реле для захисту від перепаду тиску в резервному насосі.

Структурну схему досліджуваної системи представлено нижче (рис. 2).

За рахунок вищенаведеної системи є можливість реалізації двох режимів керування насосним агрегатом – ручним та автоматичним.

Результати (Results). За нормального режиму роботи системою передбачено роботу лише основного

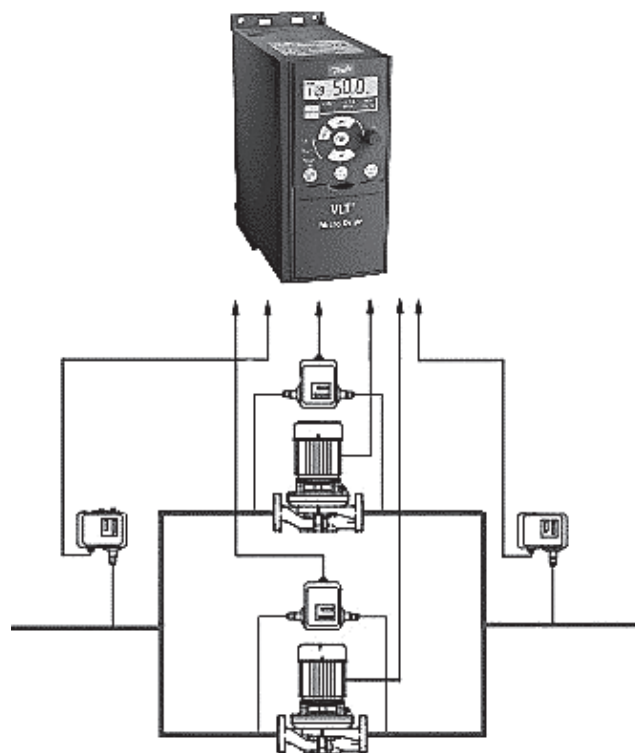


Рис. 2. Структурна схема системи перекачування води

насосу. Після зниження тиску у системі у піки або за аварійної зупинки основного насосного агрегату буде спрацьовувати реле тиску, що підключене до резервного насосного агрегату.

Система дає змогу вмикання та вимикання насосних агрегатів здійснювати як у ручному, так і в автоматизованому режимах.

Нижче (на рис. 3 та 4) представлено відповідно характеристики регульованого насосного агрегату та робочі точки у разі відкритої та закритої систем.

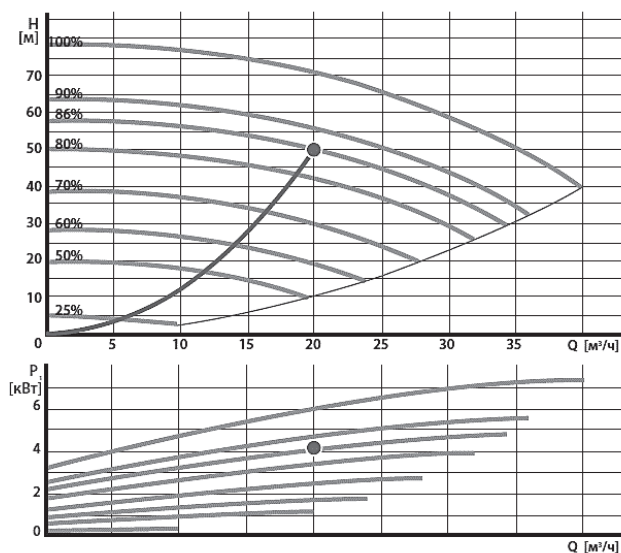


Рис. 3. Характеристики регульованого насосу

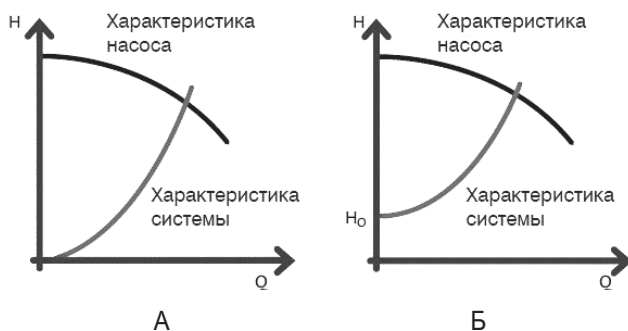


Рис. 4. Робочі точки системи:
А – замкнута система; Б – відкрита система

Встановлено, що у закритих системах насосний агрегат має працювати ще і на подолання втрат, які присутні у разі протікання по трубопроводах, клапанах та теплообмінниках. Це стосується, перш за все, систем теплопостачання, у яких насосний агрегат використовується для перекачування води, що виступає теплоносієм.

Кількість обертів електричного двигуна залежить від числа пар полюсів.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1)$$

де n – синхронна частота обертання;
 f – частота струму;
 p – кількість пар полюсів.

Змінюючи величину f , можна змінювати швидкість обертання без внесення змін у конструкцію як електродвигуна, так і самого насосного агрегату.

Тому зміну швидкості обертання насосного агрегату, а саме електричного двигуна, що є приводом, можна реалізувати внесенням у конструкцію та схему керування агрегатом саме частотного перетворювача. Зміну частоти можна вважати одним із самих ефективних методів регулювання швидкості асинхронного електродвигуна.

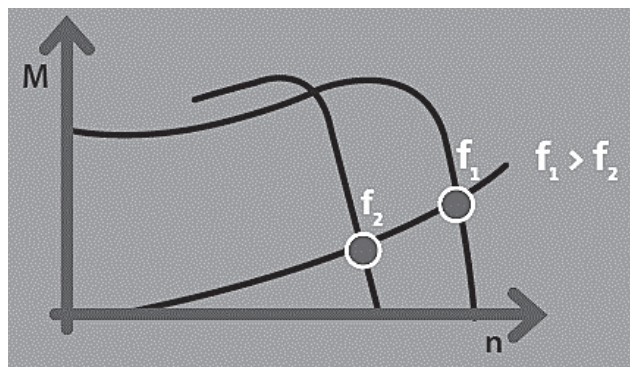


Рис. 5. Зміщення характеристик крутного моменту в електродвигуні

З рисунку 5 видно, що зміну швидкості обертання можна досягти за зміни частоти та напруги змінного струму в електричному двигуні. На цій діаграмі показано характеристику крутного моменту (M) як функцію швидкості обертання (n) за двох різних значень частоти та навантаження.

Система, що працює в автоматизованому режимі, здійснює виконання своїх функцій таким чином: якщо температуру теплоносія буде збільшено або зменшено тиск у мережі, то сигнал від відповідного датчика температури буде переданий до частотного перетворювача, який у разі плавного збільшення частоти буде збільшувати швидкість обертання валу електричного двигуна. Відповідно до цього продуктивність насосного агрегату буде збільшено до того моменту, доки не буде досягнуто усталене значення температури або тиску, що були запрограмовані до цього та які не перевищують нормативні значення.

Забезпечення автоматизації процесу відбувається за рахунок датчиків температури та тиску, а реле захисту від сухого ходу дає можливість автоматичної зупинки насосного агрегату за відсутності рідини через технічні причини (витікання, випаровування і т. п.).

Обговорення (Discussion). Дослідження, проведені у роботі (Ledukhovsky, Gorshenin, Zinovyeva, Zinovyeva, 2021) на математичній моделі конденсаційних енергоблоків та теплоелектроцентралей на початковому тиску 12,8 МПа, підтвердили ефект від переходу до частотного регулювання насосів на основі даних за фактично відпрацьований період із урахуванням взаємозв'язку витрати електроенергії для власних потреб і навантаження основного обладнання. За зміни швидкості обертання втрати потужності в перетворювачі частоти істотно перевищують зниження втрат потуж-

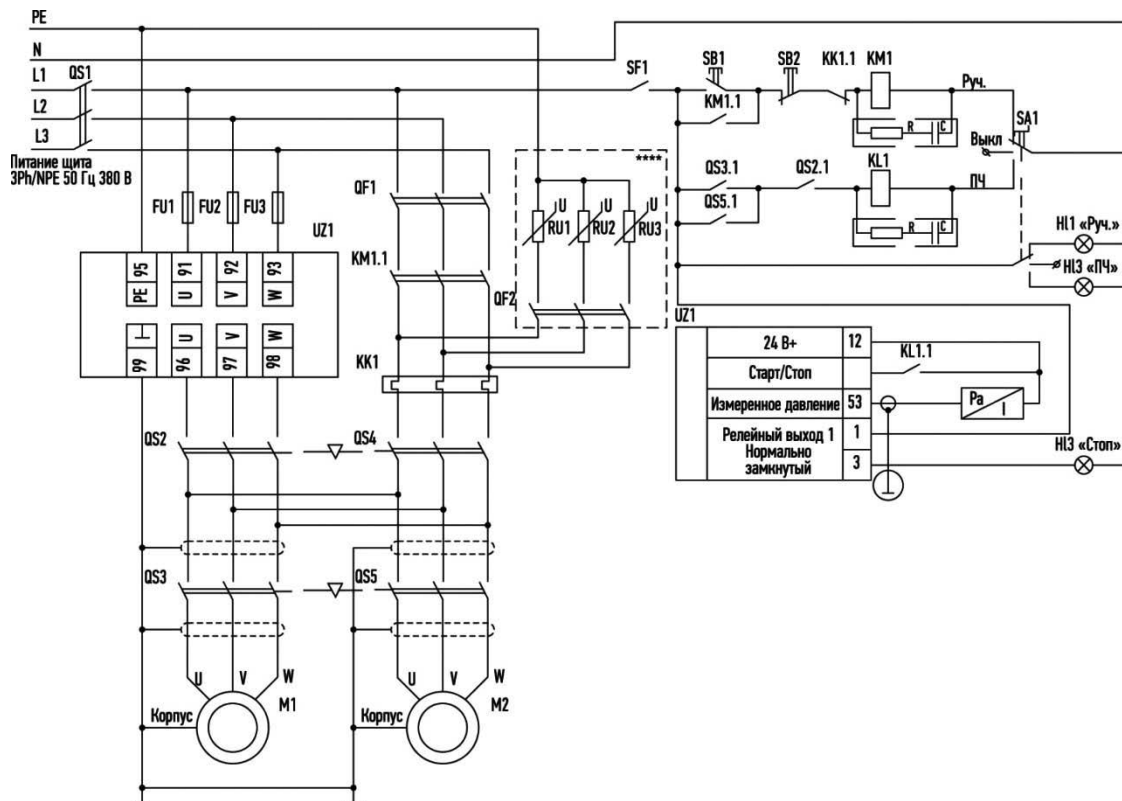


Рис. 6. Схема електрична принципова керування насосом

ності в електродвигуні (Shabanov, Khakimov, Kalimgulov, Sergeenkov, 2019). Тому у разі вибору електродвигунів, керуючись завантаженням їх та швидкістю обертання, потрібно враховувати, крім енергоспоживання, ще і те, що синхронні електродвигуни із постійними магнітами мають порівняно велику вартість, ніж асинхронні електродвигуни, труднощі їх запуску у разі значного моменту інерції, а зниження втрат потужності на перекачування у разі використання перетворювачів частоти може нести за собою підвищення ККД насосу (Goman, Oshurbekov, and Kazakbaev, Prakht, Dmitrievskii, 2020; Shabanov, Khakimov, Kalimgulov, Sergeenkov, 2019).

Аналізом сучасних методів керування насосними агрегатами в роботі (Barabanov, Gavrilov, 2017) виявлено, що частотне регулювання є найбільш сучасним методом керування електричним двигуном і може використовуватися у системах водопостачання, оскільки забезпечує захист насосного агрегату і більш плавне управління, порівнюючи з класичними методами. Однак, не враховуючи довжину трубопроводів у системі керування водопостачанням, досягнення стабільної роботи систем із заданими показниками стійкості не є можливим (Buravchenko, 2016).

У роботі 26 (Shabanov, Sharipova, 2013) наведено аналітичні дані для вибору частоти обертання регульованих насосних агрегатів як з урахуванням необхідних значень продуктивності, так і з урахуванням вимог щодо допустимого діапазону частоти обертання. Нерідко частотно-регульовані електроприводи з трифазними двигунами змінного струму в діапазонах малих та середніх потужностей обладнують перетворювачем частоти, який реалізується

у вигляді структури «Некерований випрямляч – автономний інвертор напруги» (Mukonin, Medvedev, Trubetsko, Tonn, Goremykin, Sitnikov, 2020). З метою підвищення ефективності роботи установок насосних агрегатів, крім підключення частотних перетворювачів, можливі підключення ще і компенсаторів (Kopyrin, Portnyagin, Khamitov, 2019), позаяк одним з ефективних способів зниження втрат потужності у разі активно-індуктивного навантаження є компенсація індуктивної складової частини реактивної потужності (Bakshaeva, Suvorova, Cherepanov, 2017).

Таким чином, розглянута у цій роботі система автоматизованого керування роботою насосного агрегату порівняно з іншими системами, представленими у посиланнях, дає змогу реалізації повністю автоматичного режиму роботи. Перевагою системи є виключення помилок або помилок під час керування агрегатом людиною, що реалізується у разі ручного режиму керування.

Зміни, що відбуваються у системі, – зміни тиску, об'єму рідини і т. п. – дублюються за рахунок показання світлової сигнальної арматури та відповідних датчиків. Можливе також підключення за потреби звукової сигналізації.

Автоматизація процесу не потребує зміни конструкції насосного агрегату або приводного електричного двигуна, що є досить важливим у разі, коли насосний агрегат є новим та перебуває на гарантії, а будь-які зміни, внесені в його конструкцію, можуть спричинити зняття агрегату з гарантії.

Висновки (Conclusions). Автоматизація процесу накачування рідини, що виступає у ролі теплоносія для теплопостачання житлових будинків, може бути реалізована за рахунок внесення змін у схему керування

насосним агрегатом та окремих компонентів. Автоматизований процес здатен забезпечити автономну роботу системи та зупинку насосного агрегату у разі аварійної ситуації без втручання оператора.

З огляду на те, що зміни стосуються лише додавання окремих компонентів, а не структури насосного агрегату, то система не лише втрачає надійність, а і здатна виключити відхилення у разі ручного режиму керування.

Бібліографічні посилання:

1. Novosti teplosnabzheniya. (2014). Chastotno-reguliruyemyy privod. Regulirovaniye tsentrobezhnykh nasosov i metody regulirovaniya otpuska tepla v teplovykh setyakh [Variable frequency drive. Regulation of centrifugal pumps and methods of regulation of heat supply in heating networks]. No. 1 (161). Date of access: 20.12.2021 URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3192 (in Russian).
2. Kolpakhchian, P.G., Lavronova, L.I. (2011). Energoeffektivnost' razlichnykh sposobov regulirovaniya elektroprivoda grupy nasosnykh agregatov [Energy efficiency of various ways of regulating the electric drive of a group of pumping units]. *Proceedings of universities*. North Caucasian region. *Technical science*. No. 6. P. 59–63 (in Russian).
3. Urishev, B.U., Beitullaeva, R.Kh., Gayimnazarov, I.Kh., Umirov, A.P. (2015). Vliyaniye regulirovaniya vodopodachi nasosov na vodnoenergeticheskiye parametry nasosnykh stantsiy [Influence of regulation of water supply of pumps on water-energy parameters of pumping stations]. *Topical issues of technical sciences: materials of the III Intern. scientific. conf.* (Perm, April 2015). Perm: Zebra, 2015. S. 85–86 (in Russian).
4. Mirmarine. (2021). Regulirovaniye rabochikh parametrov nasosov [Regulation of operating parameters of pumps]. Date of access: 09.01.2022. URL: <https://mirmarine.net/svm/sudovye-nasosy/1251-regulirovanie-rabochikh-parametrov-nasosov> (in Russian).
5. Ke, L. (2016). Modelirovaniye i simulyatsiya mashiny dlya ispytaniya na ustalost' nasosov s reguliruyemoy chastotoy *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 29(1). P. 92–102. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.13.
6. Araujo, L.S., Ramos, H. & Coelho, S.T. (2006). Kontrol' davleniya dlya minimizatsii utechek v upravlenii sistemami vodosnabzheniya [Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management]. *Water Resources Management*. 20(1). P. 133–149. DOI: 10.1007/s11269-006-4635-3 4 (in Russian).
7. Piratla, K.R. & Ariaratnam, S.T. (2011). Criticality Analysis of Water Distribution Pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2(3). P. 91–101. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000077.
8. Price, E. & Ostfeld, A. (2012). Successive Linear Programming Scheme for Optimal Operation of Water Distribution Networks World Environmental and Water Resources Congress. P. 2964–2970. DOI: 10.1061/9780784412312.297 6.
9. Price, E. & Ostfeld, A. (2013). Iterative Linearization Scheme for Convex Nonlinear Equations: Application to Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 139(3). P. 299–312. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000275.
10. Schwartz, R., Housh, M. & Ostfeld, A. (2016). Limited Multistage Stochastic Programming for Water Distribution Systems Optimal Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 142(10), 06016003. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000687.
11. Volkov V.A. (2018). Optimizatsiya vremen namagnichivaniya i razmagnichivaniya [Optimization of magnetization and default times]. *“Electrotehnika ta elektroenergetika”*. No. 4. P. 17–29. DOI: 10.15588/1607-6761-2018-4-2 (in Russian).
12. Shabanov, V.A., Pashkin, V.V., Ivashkin, O.N. (2019). Sposob podkhvata elektroprivoda ventilyatsionnykh i nasosnykh ustanovok pri obratnom vrashchenii rabocheho koleasa [Method for cooking up the electric drive of ventilation and pump units with reverse rotation of the impeller]. *Electrical and data processing facilities and systems*. 15(1) P. 26–32. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-26-32 (in Russian).
13. Korshunov, A., Khomyak, V., Vasilyeva, I. (2020). Frequency-current method of controlling an asynchronous three-phase motor [Frequency-current method of controlling an asynchronous three-phase motor]. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 394(4): 129–136. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-129-136 (in Russian).
14. Bibik, O.V. (2019). Vyznachennya khodiv pered proektuvannym asynkhronnykh pryvodiv pislya zmin [Determination of travels before the design of asynchronous drives in the wake of changes]. *Bulletin of NTU “Kharkiv Polytechnic Institute”*. Series: *Electrical machines and electrical engineering*. No. 1329 (4). P. 94–98. DOI: 10.20998/2409- 9295.2019.4.14 (in Ukrainian).
15. Bibik, O.V., Mazurenko, L.I., Shikhnenko, M.O. (2019) Formuvannya kharakterystyk robochykh rezhymiv ventyl'no-induktornykh dyvuhuniv z periodychnym navantazhenniam [Formation of characteristics of operating modes of valve-induction motors with periodic loading]. *Electrical engineering and electromechanics*. No. 4. P. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.02> (in Ukrainian).
16. Anikin, S.V., Burkovsky, V.L., Mukonin, A.K., Tonn, D.A., Trubetskoy, V.A. (2021). Sposob vektornogo chastnogo upravleniya asynkhronnym elektroprivodom [Method for vector private control of asynchronous electric drive]. *Voronezh State Technical University Bulletin*. T. 17. No. 5. 2021. P. 98–103. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.014 (in Russian).
17. Ivanov, V.B., Sitas, V.I., Richter, M. (2015). Otsenka effektivnosti vnedreniya gidromuft dlya regulirovaniya proizvoditel'nosti tsentrobezhnykh nasosov [Evaluation of the effectiveness of the introduction of hydraulic couplings to regulate the performance of centrifugal pumps]. *Technological audit and production reserves*. No. 1(4). P. 55–60. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47783 (in Russian).
18. Sitas, V.I., Peshk, A., Richter, M. (2005). Konkurentosposobnyy reguliruyemyy privod dlya energetiki [Competitive variable speed drive for power generation]. *Energy drink*. No. 2. P. 45. (in Russian).
19. Ivanov, V.B., Richter, M., Sitas, V.I. (2012). K voprosu o sravnitel'noy effektivnosti mekhanotronnogo i chastotno-reguliruyemogo privodov [On the question of the comparative efficiency of vacuum and variable frequency drives]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 3/10(57). P. 32–35 (in Russian).

20. Alas, P., Noulette, E. (2013). Electro Compression a Challenging Alternative: How and Why to Choose a Gas Turbine or an Electric Motor to Drive a Centrifugal Compressor Turbine. Technical Conference GT 2013, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA. ASME International. 9 p. DOI: 10.1115/gt2013-94163.
21. Ledukhovskiy, G.V., Gorshenin, S.D., Zinovyeva, E.V., Zinovyeva, A.S. (2021). Analiz effektivnosti regulirovaniya pitatel'nykh nasosov izmeneniyem chastoty vrashcheniya rotora dlya elektrostantsiy razlichnogo tipa [Analysis of the efficiency of feed pump control by changing the rotor speed for power plants of various types]. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. No. 4. P. 5–14 (in Russian).
22. Goman, V.V. and Oshurbekov, S.Kh. and Kazakbaev, V.M. and Prakht, V.A. and Dmitrievskii, V.A. (2020). Comparison of energy consumption of various electrical motors operating in a pumping unit. *Electrical Engineering & Electromechanics*. (1). 16–24. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.
23. Shabanov, V.A., Khakimov, E.F., Kalimkulov, A.R., Sergeenkov, E.V. (2019). Issledovaniye zavisimosti KPD elektrodvigatelya i preobrazovatelya chastoty ot koeffitsiyenta zagruzki i chastoty vrashcheniya [Research of the dependence of efficiency of electric motor and frequency converter on loading coefficient and rotation frequency]. *Electrical and information complexes and systems*. No. 4, т. 15, P. 83–90. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-83-90 (in Russian).
24. Barabanov, V.G., Gavrilov, D.P. (2017). Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya nasosnoy ustanovkoy [Development and research of a control system for a pumping unit]. *Bulletin of SUSU. Ser. Mechanical engineering*. T. 17, No. 2. P. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202 (in Russian).
25. Buravchenko, K.O. (2016). Doslidzhennya ta analiz dynamiky protsesu rehulyuvannya nasosnym ahrehatom. Tekhnolohicheskyy audyt y rezervy proyzvodstva [Preliminary and analysis of the dynamics of the process of regulation by the pumping unit]. *Technological audit and production reserves*. T. 3, No. 2 (29). P. 15–19. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.71878 (in Ukrainian).
26. Shabanov, V.A., Sharipova, S.F. (2013). Trebovaniya k chastote vrashcheniya magistral'nykh nasosov pri chastotno-reguliruyemom elektroprivode [Requirements to the speed of rotation of main pumps with a frequency-controlled electric drive]. *Electrical and information complexes and systems*. No. 3. T. 9. P. 42–46 (in Russian).
27. Mukonin, A.K., Medvedev, V.A., Trubetskoy, V.A., Tonn, D.A., Goremykin, S.A., Sitnikov, N.V. (2020). Povysheniye nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Increasing the reliability of automatic control systems of technological processes]. *Voronezh State Technical University Bulletin*. T. 16. No. 4. P. 56–63. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.4.007 (in Russian).
28. Kopyrin, V.A., Portnyagin, A.L., Khamitov, R.N. (2019). Puti povysheniya effektivnosti ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov dobychi nefiti [Ways to increase the efficiency of electric centrifugal pumps for oil production]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. T. 330. No. 11. 155–162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361 (in Russian).
29. 1860–2014. IEEE Guide for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation at 1000 kV AC and Above. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6861419.
30. Bakshaeva, N.S., Suvorova, I.A., Cherepanov, V.V. (2017). Voltage quality improving in power distribution networks with abruptly variable load by application of reactive power series compensation devices. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076281.

Yurchenko O. Y., Assistant, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Barsukova H. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Using a frequency converter is an effective and convenient way to control the speed of the pump unit

The article considers a system that allows automated control of the pump unit in different operating modes. The system provides manual and automatic control modes, which allows, mainly in automatic control mode, to eliminate the percentage of failures due to the human factor. The operation of the system is based mainly on the use of a frequency converter, which is the main element in the system under consideration, and auxiliary structural elements, such as relays for protection against “dry running”, relays for protection against pressure drops in the main and backup pumps, sensors temperature and pressure.

The need for constant high-precision change of the speed of the pump unit can be solved by such a system, the principle of which is to receive periodic, when necessary, signals to the frequency converter, which, depending on the speed of the pump unit to be achieved, will regulate the frequency that directly affects the speed of the electric motor, which is the drive motor for the pump unit. For example, when the water pressure in the system decreases, a signal will be sent to the frequency converter via the temperature sensors and the differential pressure switch, which will increase the frequency of the electromagnetic field. By increasing the frequency and, at the same time, the constant number of pole pairs in the electric motor, a higher motor speed will be achieved, which will increase the productivity of the pump unit, which pumps a certain amount of fluid whose pressure is predetermined and programmed as a standard pressure system. By increasing the frequency and, consequently, the performance of the pump set, the pressure in the system will be raised to the standard value, after which the pump unit will run at its usual speed.

Thus, any deviations of the system parameters from the working ones are controlled and regulated by sensors and temperature relays, as well as a frequency converter, which by changing the frequency changes the speed and, consequently, changes the performance of the pump unit, used in heat or water supply systems of both residential buildings and industrial enterprises of individual consumer groups.

Key words: pump, frequency, current, rotation, performance, pressure, dependence.

Дата надходження 16.09.2021 р.

НОТАТКИ