

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
ТРИДЦЯТЬ П'ЯТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»

2 – 5 вересня 2025 р.

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Акціонерне товариство «ФЕД»

Державне підприємство «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС»

Державне підприємство «Харківське агрегатне конструкторське бюро»

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ТРИДЦЯТЬ П'ЯТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»

2 – 5 вересня 2025 р.

Харків «ХАІ» 2025

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» (протокол № 02 від 24.09.2025)

Н75 Нові технології в машинобудуванні [Текст]: тези доп. Тридцять п'ятої Всеукраїн. конф. 2–5 верес. 2025 р. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2025. – 228 с.

ISBN 978-966-662-969-5

Матеріали доповідей Всеукраїнської конференції містять результати наступних досліджень: загальні питання машинобудування; сучасні технології проектування, виготовлення й зміцнення деталей агрегатів та різального інструменту; процеси автоматизації та роботизації; функціональні комплекси логістичних систем; питання проектування робіт; технології обладнання з ЧПК; процеси фізико-технічної обробки та нанотехнології; системи автоматичного керування і діагностики; інноваційні інформаційні технології.

Для здобувачів освіти, викладачів і наукових працівників.

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Литвинов О. М. – д-р юрид. наук, професор, в. о. ректора ХАІ.

Заступник голови: Баранов О. О. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем ХАІ.

Відповідальний секретар: Сисосєв Ю. О. – д-р техн. наук, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем ХАІ.

Члени комітету:

Кравченко І. Ф. – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, генеральний конструктор - директор ДП «Івченко-Прогрес»;

Попов В. В. – д.т.н., голова правління АТ «ФЕД».

Бобирь М. І. – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор механіко-машинобудівного інституту «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

Широкий Ю. В. – канд. техн. наук, декан факультету авіаційних двигунів ХАІ;

Клименко С. А. – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля;

Пермяков О. А. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів ХПІ;

Федорович О. Є. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій ХАІ;

Планковський С. І. – д-р техн. наук, професор, директор Навчально-наукового інституту енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова;

Добротворський С. С. – д-р техн. наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Познанського університету природничих наук, Польща;

Сметанкіна Н. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України.

УДК 621.002:620.3:004.9(063)

ISBN 978-966-662-963-5

© Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», 2025

ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ.....	8
Доценко В.Н., Ковеза Ю.В. Вибір допустимого напруження при проектувальному розрахунку вала	8
Кузнецова А.В., Гнисько О.М. Моделювання контакту двоопукло-ввігнутих зубців конічних передач.....	10
Московська Н.М. Дослідження деформування конструкцій з отворами під дією теплового навантаження.....	11
Назін В.І., Сідий Е.Ю. Гідростатичний підшипник з регульованою подачею рідини.....	13
Онисько О.Р., Одосій З.М., Голик Т.Б. Сучасні підходи забезпечення міцності конічних замкових нарізей із підвищеними механічними властивостями.....	15
Pylypenko M.M., Yefimov O.V., Stadnik Yu.S. Enhancement in the properties of fuel claddings material	17
Світличний С.П. Діагностика і аналіз руйнувань та пошкоджень підшипників кочення	20
Усік В.В., Кладова О.Ю. Аналіз роботи диференціальних механізмів авіаційних редукторів	27
Фомін О.В., Бурлуцький О.В. Багатоцільова оптимізація хімічного складу сталі машинобудівних конструкцій для підвищення властивостей	29
Шатохін В.М., Соболев В.М. Синтез параметрів нелінійної моделі машинного агрегату з двовальним дизелем	33
Шатохін В.М., Соболев В.М. Моделювання динамічних процесів у силовому ланцюзі механізму повороту гусеничної машини з гідрооб'ємною передачею.....	38
Шехов О.В. Дворівнева оптимізація вибору коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс планетарного механізму типу ЗК.....	43
2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, АГРЕГАТІВ ТА ІНСТРУМЕНТУ	49
Бойко Л.Г., Даценко В.А., Піжанкова Н.В. Метод визначення термогазодинамічних параметрів та характеристик турбовального газотурбінного двигуна з повінцевим двовимірним описом компресора в його системі	49
Wang Z. Використання принципу уніфікації в технологічній оснастки при егш крупних листових деталей.....	50
Гвоздецький В.М., Яремчук Д.О., Гасій О.Б. Підвищення працездатності шківів пасових передач.....	53
Доценко В.М., Ковеза Ю.В. Підшипники ковзання для ротора двигуна малогабаритного БПЛА	58
Кубіч В.І., Фасоль Е.О., Чернета О.Г. Підходи до фізичного моделювання прояву механічних властивостей жароміцних покриттів у вузлах ГТУ.....	60

Малков І.В. Термостабілізація вуглепластикових ферменних конструкцій космічних апаратів.....	65
Нарижний О.Г., Тараненко М.Є. Точність обчислювання математичної моделі електрогідравлічного ефекту на коливальному етапі.....	70
Омельченко О.В., Воденніков С.А., Широкобокова Н.В. Застосування 3D-друку для виготовлення інструменту при відцентровому литті	75
Папаїка О.А., Шехов О.В. Моделювання випробувань пластикової пляшки на падіння в програмному середовищі Solidworks Simulation	77
Плахотников С.В., Овчаров Б.А. Особливості розрахунку та проектування сітчастих конструкцій з композіційного матеріалу	81
Ruzaikin V., Breus A., Torosian O., Lukashov I. Features of the phase distribution of ammonia flow in tee connections.....	86
Ruzaikin V., Lukashov I., Breus A., Torosian O. Study of the accuracy of the capillary rise method in determining the equilibrium contact angle between ammonia and stainless steel	89
Саєнко С.Ю., Мсаллам К.П. Особливості конструкції фітингів у системі охолодження кабелів.....	90
Семененко О.Д. Аналіз застосування безпілотних літальних апаратів на водневих паливних елементах	93
Семененко О.Д., Сорока А.С. Розвиток та застосування нанотехнологій у електротехніці.....	96
Торосян О.В. Вплив візуалізації на ефективність проектування конструкцій.....	98
Фомін О.В., Козинка О.С. Використання армувальних наповнювачів в поліуретановій матриці для вібродемпфуючих та захисних покриттів для металевих конструкцій рухомого складу	99
3. ПРОЦЕСИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОБОТИЗАЦІЇ	102
Зорік І.В., Шорінов О.В., Іпатов Р.С. Щодо питання автоматизації процесу холодного газодинамічного напильювання покриттів.....	102
Мажара В.А., Тененика С.А. Використання двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв	106
Семененко Ю.О., Семененко О.І., Степанча Є.Ю. Огляд методу детальної діагностики несправностей тягового електроприводу електропоїзда	109
Сисоєв Ю.О., Торосян О.В. Автоматична система вимірювання температури поверхні виробів при отриманні вакуумно-дугових покриттів	111
4. ФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	113
Слізева А.В. Багатокритерійний метод пошуку оптимальних маршрутів перевезень.....	113
Руденко Н.В. Адаптивні стратегії управління виробництвом в умовах високої волатильності ринків та руйнівних інновацій	114
Тараненко М.Є., Кобріна Н.В. Формування складу показників властивостей якості транспортних систем.....	115

5. ПРОЄКТУВАННЯ РОБОТІВ.....	118
Баранова Є.О., Баранов О.О. Обернена задача кінематики для відкритої роботизованої платформи типу AR3.....	118
Ковальов М.П., Баранов О.О. Гвинтовий метод у задачі оберненої кінематики портального маніпулятора з п'ятьма ступенями свободи	124
Сорока А.С., Баранов О.О. Алгебраїчне розв'язання оберненої задачі кінематики підлогового робота-маніпулятора з гібридною структурою	130
Уколов Б.В., Баранов О.О. Аналіз прямої кінематики навчального робота-маніпулятора з чотирма ступенями свободи методом Денавіта–Хартенберга	136
Усік В.В., Кладова О.Ю. Диференціальні механізми в маніпуляторах і механізмах роботів	141
6. ТЕХНОЛОГІЯ ОБЛАДНАННЯ З ЧПК.....	144
Бичков І.В., Лисоченко І.М., Бичков М.І. Інформаційне забезпечення механічної обробки деталей у авіабудівництві.....	144
Бичков М.І., Рогаченко М.С. Аналітичний еталон устаткування та його застосування при формоутворенні на верстатах з ЧПК.....	145
Бреус А.О., Кошарний О.М. Обробка деталей на верстатах з ЧПК за допомогою САМ системи ESPRIT в умовах роботизованого виробництва.....	148
Гнисько О.М., Кузнецова А.В. Дослідження процесу заповнення профільних пазів стружкою під час фрезерування	149
Ломанов К.О., Головка М.О. Статистичні методи оцінювання якості технологічних процесів при обмеженій кількості інформації.....	150
Sorokin M., Aksyonov Y. A review of adaptive feedrate planning strategies in free-form surface milling.....	152
7. ПРОЦЕСИ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ.....	155
Баранов О.О., Бреус А.О., Абашин С.Л. Особливості синтезу метал-оксидних та вуглецевих наноструктур дією потоків плазми	155
Басов В.В., Трубін Д.В., Миколай Косцінський. Особливості світловідбивання лазерно-текстурованих поверхонь зі сталі AISI 321	161
Головка С.Т., Бреус А.О., Бочкарьов О.В. Технологічна підготовка поверхні керамічних втулок із матеріалу ВК-98 для нанесення нікель-молібденового покриття для використання в іоно-плазмових двигунах холівського типу	162
Довженко О.В. Теоретичні дослідження можливості отримання наноструктур на ріжучому інструменті з кібориту при дії лазерного випромінювання.....	164
Кононенко С.М., Добротворський С.С. Моделювання трибологічної поведінки періодичних наноструктур з прямокутною та згладженою морфологією профілю методом молекулярної динаміки.....	166
Савченко Н.В., Шорінов О.В., Білан Д.О. Утворення інтерметалідних структур в газодинамічних покриттях під дією термічного оброблення	167

Семененко О.Д. Дослідження розміру зерна у твердому сплаві T15K6 під впливом іонного опромінення	169
Сисоєв Ю.О., Постельник Т.В. Підвищення енергоефективності установок для отримання вакуумно-дугових покриттів.....	172
Степаненко Д.Р. Дослідження фізичних методів осадження покриттів на основі аналізу PVD систем з арковою конфігурацією магнітного поля	175
Широкий Ю.В., Фесенко Є.І. Комбіноване зміцнення конструкційних матеріалів та РІ із застосуванням енергоємних потоків.....	176
Широкий Ю.В., Безпалов Д.І., Кот Н.І. Аналіз можливостей отримання наноструктур при комбінованих методах зміцнення сталей	178
Широкий Ю.В., Постельник Т.О. Дослідження теплофізичних та термомеханічних характеристик поверхонь вуглецевих сталей під час формування наноструктур лазером	180
Широкий Ю.В., Торосян О.В., Жидєєв П.Р. Теоретичне дослідження впливу TaN на зміцнення твердих сплавів лазерним випромінюванням	181
8. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКИ	183
Бреус А.О., Малашта П.П., Баранова Є.О. Джерело живлення для ініціювання та підтримання розряду вакуумно-дугового двигуна супутника формату CubeSat.....	183
Засід Є.С., Степаненко Д.Р. Дистанційна система керування приводами маніпулятора....	184
Лукашов І.М., Рузайкін В.І., Косенко О.В. Впровадження комп'ютерного зору та спеціальних сигналів на підприємствах для підвищення безпеки співробітників	186
Протас Є.С., Белявський О.В., Косенко О.В. Структурне моделювання системи керування приводом головного руху токарного верстата з ЧПК.....	188
Сорока А.С., Степаненко Д.Р. Дистанційна система керування колісним роботом	192
Степаненко Д.Р., Кот Н.І. Підхід до моделювання системи керування пневматичними приводами через контролери Arduino або ESP32	194
9. ІННОВАЦІЙНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	197
Федорович О.Є., Попов А.В., Пісклова Т.С. Моделі та інформаційна технологія запобігання старіння техногенних систем	197
Федорович О.Є., Губка О.С., Малєєв Л.В. Метод та інформаційна технологія адаптивно-компонентного проектування нових зразків техніки.....	198
Федорович О.Є., Попов А.В., Федорович В.А. Моделі та інформаційна технологія дослідження впливу вразливостей на ураження логістичної інфраструктури від дронів атак противника.....	199
Федорович О.Є., Рибка А.В., Соловйов В.С. Моделі та інформаційна технологія планування відносно безпечних маршрутів польоту рою ударних дронів	200
Федорович О.Є., Рибка К.О., Коновалова О.В. Моделі та інформаційна технологія дослідження логістичних дій щодо створення оборони об'єктів подвійного призначення	201

Архіпов О.В., Кривенко С.С., Лукін В.В. Автоматизація стиснення триканальних зображень без візуально помітних втрат	202
Громенко А.І., Лещенко О.Б. Використанням нейромереж для підтримки прийняття рішень керування роєм дронів	206
Головковський О.І., Лещенко Ю.О. Веб-застосунок для управління особистими фінансами.....	207
Гордієнко К.Р., Лещенко Ю.О. Веб-застосунок системи для приватного видавництва	208
Губка О.С., Губка С.О. Розробка застосунку обліку медичних оглядів співробітників підприємства.....	209
Ігнатюк Є.О., Попов А.В. Застосування методів машинного навчання для аналізу UX/UI-даних масових опитувань користувачів	210
Ковтун Д.Д., Гриневич П.С. Розробка Telegram-боту для велоквестів	213
Лещенко Ю.О., Макаренко Т.С. Дослідження поведінки користувачів інформаційних SAAS-систем.....	215
Лещенко Ю.О., Швець Ф.С. Використання дронів для вирішення завдань сільського господарства	216
Лещенко О.Б., Анікін А.М. Використання платформи InterSystems IRIS Data Platform для побудови високопродуктивного вебдодатка івент послуг	217
Момот М.О., Федотовських Р.А. Розробка застосунку інформаційної системи кардіологічного відділення лікарні	218
Попов А.В., Діденко С.І. Застосунок симуляції VOIDS штучного життя зграї тварин	220
Федорович О.Є., Лещенко Ю.О., Пісклова Т.С. Моделі та інформаційна технологія дослідження хвильових атак рою ударних дронів	221
Сідін В.О., Лещенко Ю.О. Веб-застосунок для керування подіями	222
Старченко В.С., Яшина О.С. Мобільний застосунок для вивчення німецької лексики.....	223
Романов М.С. Підбір посади при навчанні за ДФЗО для опанування/поглиблення компетентностей в рамках дисципліни «Проектування гнучких автоматизованих виробництв» освітньої програми «Робототехнічні системи та комплекси»	226

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.8

Доценко В.Н., д.т.н., професор
V.Dotsenko@khai.edu
Ковеза Ю.В., к.т.н., доцент
I.Koveza@khai.edu

ВИБІР ДОПУСТИМОГО НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАЛЬНОМУ РОЗРАХУНКУ ВАЛА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вали – це деталі, призначені для передачі крутного моменту вздовж своєї осі та для підтримки обертових деталей машин. Вали розраховують на міцність, жорсткість і коливання (на критичну швидкість). Розрахунок валів на міцність проводять у два етапи: перший – проектувальний, другий – перевірний. У проектувальному розрахунку призначають матеріал вала і наближено знаходять його діаметр і розробляють конструкцію. У перевірочному розрахунку визначають коефіцієнти запасу втомної і статичної міцності, а також, якщо необхідно, перевіряють вал на жорсткість і коливання.

При проектувальному розрахунку зазвичай відомі параметри навантаження: крутний момент і знайдені попередньо сили. На цьому етапі вал ще не сформований, і неможливо розрахувати діючі згинальні моменти, тому попередньо визначають діаметр валу з розрахунку тільки на кручення при знижених допустимих напруженнях:

$$d = \sqrt[3]{\frac{1000 T}{0,2(1 - \alpha^4) [\tau_{кр}]}} \quad (1)$$

Тут T – крутний момент, Нм; d – діаметр вала, мм; $[\tau_{кр}]$ – умовні допустимі напруження при крученні, МПа; $[\tau_{кр}]$ беруть 20..50 МПа – для валів редукторів загального машинобудування і 60...90 МПа – для валів авіаційних редукторів.

Після попереднього визначення діаметра вала розробляють його конструкцію, передбачаючи посадочні місця для підшипників, коліс, ущільнень, муфт тощо.

Жорсткість вала зазвичай характеризується величиною пружного вигину y (рис. 1), що виникає від дії сил і моментів.

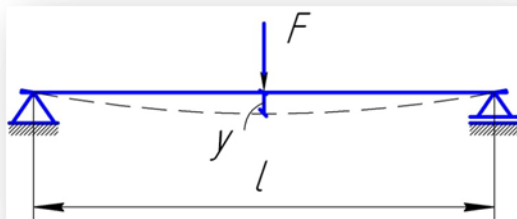


Рис. 1. Схема навантаження вала

Умова достатньої жорсткості вала має вигляд

$$y \leq [y]. \quad (2)$$

Величина $[y]$ мала (наприклад для валів циліндричних зубчастих передач $[y] \leq 0,01m$, для валів конічних передач $[y] \leq 0,005m$, де m – модуль зачеплення, мм).

Часто це призводить до того, що діаметр вала визначають не за умовою міцності, а за умовою жорсткості. Тому було б зручно ще на етапі проектувального розрахунку діаметру визначити, який із критеріїв є суттєвішим.

Прогин вала у найпростішому випадку (див. рис. 1) визначають за формулою

$$y = \frac{Fl^3}{48EJ}, \quad (3)$$

де J – момент інерції валу, мм^4 ; E – модуль пружності його матеріалу, МПа.

У більш складних випадках величину прогину знаходять за допомогою інтеграла Мора або методом Верещагіна.

Вочевидь чім більше допустиме напруження, тим менше діаметр валу та його вага, але тим більший прогин вала. У формулі (3) є два невідомих геометричних параметра: відстань між опорами l і розрахований діаметр d , тому введемо їх відношення $\rho = l/d$ і перепишем умову жорсткості (2) наступним чином

$$y = \frac{64F\rho^3}{48E\pi d(1-\alpha^4)} \leq [y]; \quad (4)$$

тоді можна знайти залежність діаметра d від співвідношення l/d при різних значеннях навантаження

$$d = \frac{64F\rho^3}{48E\pi[y](1-\alpha^4)}. \quad (5)$$

На рис. 2 подано залежність прогину вала y від $[\tau_{кр}]$ при різних ρ і постійних навантаженнях $T = 200$ Нм і $F = 28\,000$ Н. В результаті дослідження виявилось, що прогин мало залежить від умовних допустимих напружень при крученні $[\tau_{кр}]$ (у межах 40 %), але суттєво – в рази – від параметра ρ . Якщо його значення менш чим 2,5...3, необхідна згінна жорсткість забезпечена міцністю на кручення і перевірка у цьому випадку не потрібна. Але при більших ρ навпаки: перевірка на жорсткість обов'язкова і порахований таким чином діаметр буде достатнім для міцності на кручення.

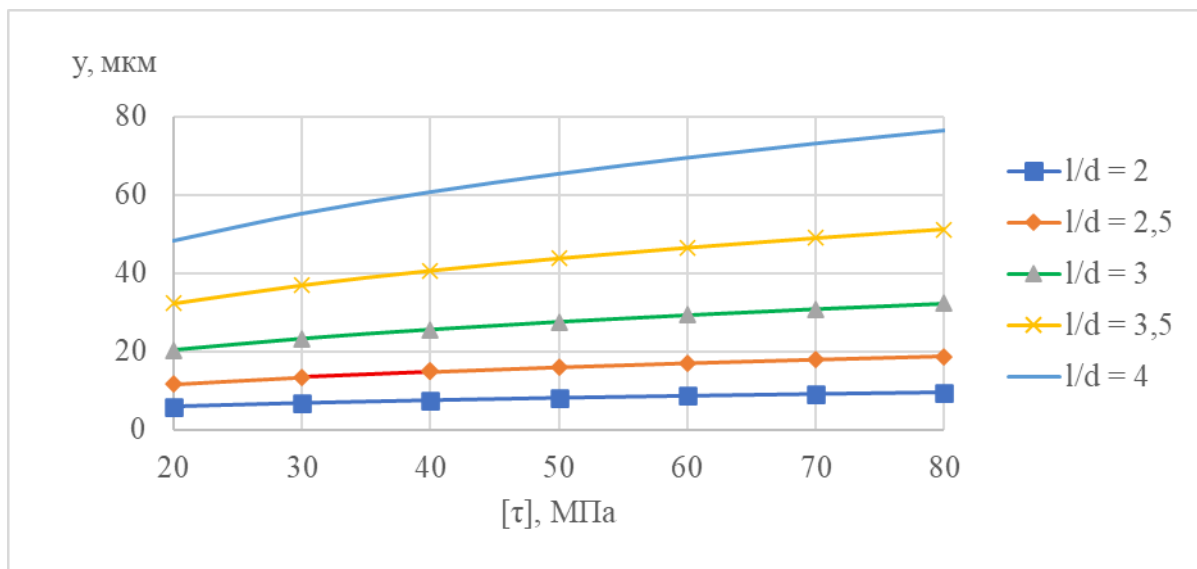


Рис. 2. Результати розрахунку

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТУ ДВООПУКЛО-ВВІГНУТИХ ЗУБЦІВ КОНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В останні роки з метою підвищення надійності редукторів важконавантажених машин застосовують конічні зубчасті передачі із двоопукло-ввігнутими зубцями (ДОВ-зубцями). Однак, якщо дослідженню роботи зубців циліндричних і конічних передач приділяється велика увага, то конічні передачі з ДОВ-зубцями є недостатньо вивченими.

Для математичного опису профільної поверхні зуба розроблено математичну модель. За допомогою систем автоматизованого тривимірного проєктування за отриманими залежностями були створені тривимірні моделі шестірні й колеса. Після введення шестірні й колеса у зачеплення було перевірено й підтверджено сталість передатного відношення.

Розрахунок швидкостей ковзання профілів, що знаходяться в контакті, обчислювався за наступною залежністю:

$$V_{ск} = L_{KP} \cdot (\omega_1 + \omega_2)$$

де L_{KP} – відстань від полюса зачеплення до точки контакту;

ω_1, ω_2 – кутові швидкості шестірні й колеса відповідно.

Графік зміни швидкостей ковзання $V_{ск}$ залежно від кута повороту шестірні φ наведений на рисунку 1.

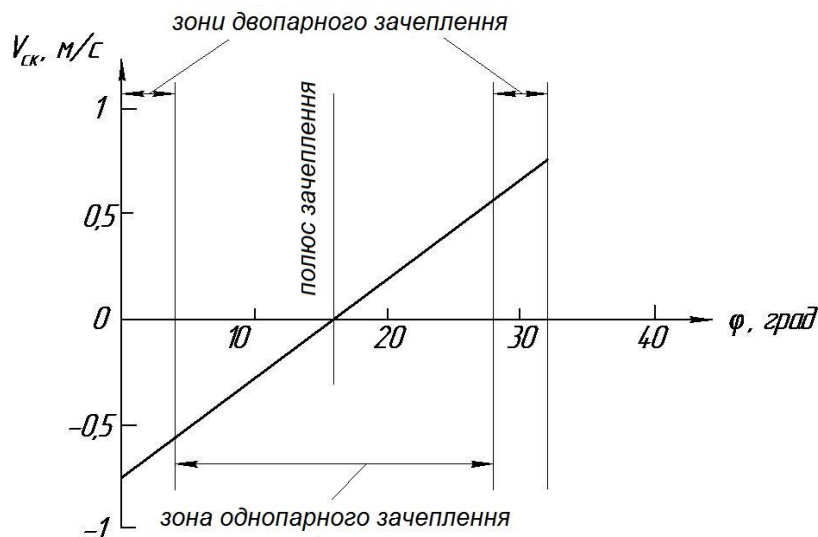


Рис. 1. Графік зміни швидкостей ковзання в зачепленні

Як бачимо, розподіл швидкостей ковзання являє собою пряму лінію, що цілком відповідає теоретичним даним. Надалі можливо використання вищевикладеної математичної моделі для прогнозування довговічності конічних коліс із ДОВ-зубцями. В даній моделі дотримується сталість передатного відношення в процесі обертання шестірні й колеса, а розподіл швидкостей ковзання являє собою пряму лінію. Отже, конічні колеса із ДОВ-зубцями становлять значний інтерес для дослідження.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ З ОТВОРАМИ
ПІД ДІЄЮ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Класичне застосування методів програмного визначення НДС конструкцій з отворами базується на визначенні напружень у оболонкових конструкціях під дією рівномірного внутрішнього тиску або у пластинах під дією зовнішнього навантаження. При цьому традиційно розглядаються варіанти отворів як з підкріплювальними включеннями (підсилення) так і без них. Однак існує велика кількість технологічних конструкцій, які використовують отвори в експлуатаційних умовах, де домінуючим є не силове навантаження, а температурне. Температура по товщині тонкостінної конструкції за дією рівнодійної дії на неї згинального моменту. Тому, якщо перепад температур по товщині пластини залишається постійною величиною в межах всієї деталі, то вона має деформацію, звану чистим вигином. Така деформація може бути критичною у випадку, коли отвір використовується для встановлення суміжних елементів, особливо виготовлених з матеріалів, що мають принципово відмінні фізичні властивості. Прикладом таких конструкцій можуть бути оглядові вікна в апаратах, люки тощо. Таким чином дослідження впливу локальних концентраторів на деформацію конструктивного елемента під дією температурного впливу є актуальним завданням механіки твердого тіла.

При реалізації дослідження було висунуто припущення, що величина деформації пластини може бути змінена шляхом внесення в конструкцію додаткових вирізів. Данна теорія перевірялась на пластині яка не має вирізів і порівнювалась з пластинами з центральним вирізом та двома симетричними вирізами. Як матеріал пластини було обрано сплав алюмінію (1060 Сплав – у бібліотеці SolidWorks Simulation), коефіцієнт теплового розширення якого дорівнює $2.4 \cdot 10^{-5}$ К. Розмір пластинки – 100x50x1 мм, температурне навантаження $t=400^{\circ}\text{C}$, спосіб закріплення – затиснення з двох сторін.

У результаті проведеного дослідження було отримано наступні максимальні значення переміщення та деформації пластин, наведені на рисунку 1.

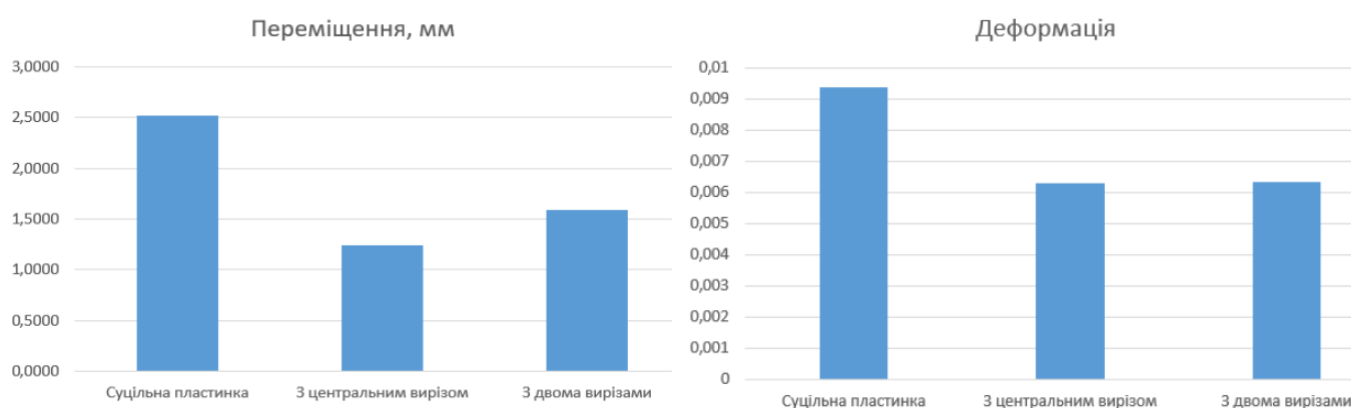


Рис. 1. Переміщення та деформація пластин

Аналогічне дослідження за тих же умов (геометрія пластин, рівень температурного навантаження) було проведено для пластин, що дублюються додатковою суцільною пластиною з того ж самого матеріалу (імітація люку). Результати спільного переміщення та деформації за вказаних умов наведено на рисунку 2.

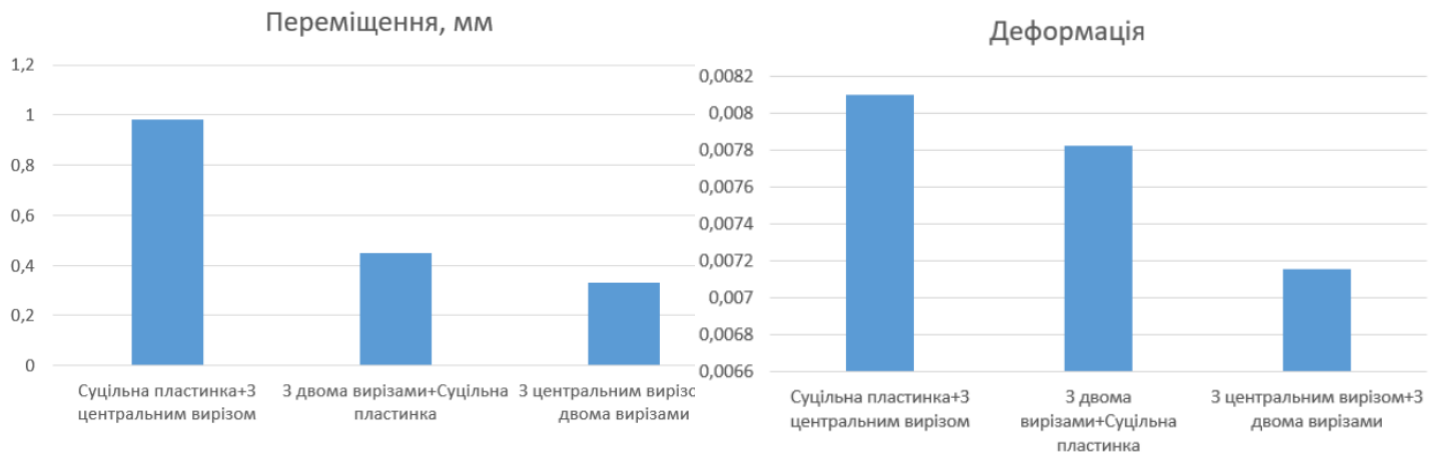


Рис. 2. Переміщення та деформація пластин, дубльованих пластиною з алюмінієвого сплаву

Третій варіант дослідження передбачав дублювання тих самих пластин листом скла з коефіцієнтом теплового розширення $9 \cdot 10^{-6}$ К. Даний вид дослідження є експериментальним, оскільки не зважаючи на можливість використання цього матеріалу, закладену у бібліотеці SolidWorks Simulation, скло є аморфним матеріалом, тож отримані результати (рис. 3) є тільки довідковими. Цей варіант дослідження передбачав імітацію наявності вікна у конструкції.



Рис. 3. Переміщення та деформація пластин, дубльованих склом

Згідно аналізу отриманих результатів, можна зробити висновок, що за умови збереження загальної площі отворів при використанні пластини без дублювання, деформація є майже незмінною та меншою за суцільну пластину, в той час як переміщення тим менше, чим більша кількість отворів. При використанні у якості дублювання матеріалу, аналогічного основній пластині деформація та переміщення ведуть себе ідентично – чим більша кількість отворів, тим нижче їх значення. Дублювання склом продемонструвало максимальне значення деформації у зоні великого отвору, а максимальне значення переміщення – у варіанті суцільної пластини.

ГІДРОСТАТИЧНИЙ ПІДШИПНИК З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ РІДИНИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Для підвищення надійності роботи опор роторів потужних енергоустановок пропонується використання гідростатичних підшипників з регульованою подачею робочої рідини. Це сприятиме поліпшенню роботи опор роторів в екстремальних умовах, зменшенню втрат потужностей на тертя і підвищенню ресурсу опори і енергоустановки загалом. Цей захід особливо важливий для потужних роторів атомних електростанцій. Де на підшипник діють навантаження, які дорівнюють десятки тон і в екстремальних умовах пуску, зупинки або перевантаженнях. Гідростатичні підшипники виключають необхідність використання додаткової масляної системи і підвищують пожежну безпеку. Використання гідростатичних підшипників з регульованою подачею робочої рідини підвищує демпфуючу здатність опори. Зменшує амплітуди коливань при дії змінних навантажень і розширює діапазон стійкої роботи ротора. Основним критерієм працездатності підшипників рідинного тертя є мінімальна товщина шару мастильного матеріалу. Ця робота присвячена розробці системи регулювання подачі робочої рідини у тих випадках, коли мінімальний зазор підшипника стане менше деякого критичного зазору. Розробка системи підводу рідини автоматично забезпечує збільшення кількості робочої рідини у несучі камери, які виконані на робочій поверхні підшипника, тиск у камерах зростає і ротор спливає на мастильній плівки. Таким чином не відбувається небезпечного контакту робочих поверхонь ротора і підшипника. Величина зазору значно впливає на характеристику підшипника. Тому точність визначення зазору між валом і підшипником має велике значення. Існують різні типи датчиків визначення зазору в підшипнику. При виборі типу датчиків розглядалися індуктивні, ультразвукові та оптичні датчики. Датчики для вимірювання відстані між ротором і підшипником можуть використовувати різні принципи вимірювання, але вони мають електронний вихідний сигнал, величина якого пропорційна відстані між поверхнями, які вимірюються. Індуктивні датчики визначають відстань до металевих об'єктів, таких як сталь, латунь, алюміній. Тому що принцип роботи індуктивних датчиків заснований на визначенні токів взаємної індукції. Такі датчики дуже стійкі до впливу неметалевих предметів і перешкод, таких як, наприклад, пил або мастильний матеріал. Сучасні технології дозволяють створювати індуктивні датчики з аналоговим виходом, які мають діаметр 6 мм і вимірювану відстань 2 мм. Таки датчики з високою роздільною здатністю та швидким часом спрацювання знаходять застосування в більшості швидкохідних машин. Разом з тим, незважаючи на високу точність і швидкість спрацювання, вони мають суттєву нелінійність, яка складає 3-5 відсотка, а це представляє певну проблему. Щоб подолати цей недолік деякі виробники визначають вихідний сигнал датчика як поліному функцію, математично описуючу сигнал, і тим самим дають можливість запрограмувати за допомогою такої функції більшість сучасних контролерів для більш точного алгоритму вимірювання. Проблеми з нелінійністю можуть бути також вирішені з використанням інтегрованого в датчик мікропроцесора. Такий метод дозволяє здійснити лінеаризацію вихідної характеристики датчика і суттєво зменшити нелінійність. Наприклад індуктивний датчик діаметром 12 мм і відстанню вимірювання 0-4 мм, із вбудованим мікропроцесором має нелінійність менш ніж 0,4 відсотка. Принцип дії ультразвукових датчиків відстані заснований на випромінюванні імпульсів ультразвуку і вимірюванні імпульсу, якій повернеться після контакту з поверхнею, відстань до якій вимірюється. Завдяки тому, що п'єзореzystорний перетворювач може служити як випромінювачем, так і приймачем ультразвукових імпульсів, з'являється можливість створити ультразвукові датчики відстані з

одним перетворювачем. Такий перетворювач з початку випромінює короткий ультразвуковий імпульс. Одночасно з цим, в датчики запускається внутрішній таймер. Коли відбитий від об'єкту ультразвуковий імпульс повернеться назад в датчик, таймер зупиниться. Час, що минув між моментом випромінювання імпульсу і моментом, коли відбитий імпульс повернувся в датчик служить основою для розрахунків відстані до об'єкту. Повний контроль за процесом вимірювання здійснюється за допомогою мікропроцесора, який забезпечує високу лінійність вимірювання. Найбільш важливими особливостями використання ультразвукових датчиків є їх можливість вимірювати відстані до таких складних об'єктів як сипучі матеріали, рідини, гранули, прозорі, або навпаки поверхні, що сильно відображають. Крім того ультразвукові датчики можливо використовувати для вимірювання порівняно великих відстаней, при цьому зберігає їх невеликі розміри, що може бути суттєво для деяких випадків. Однак ультразвукові датчики мають ряд недоліків. Насамперед це піна і інші об'єкти, які сильно поглинають ультразвукові коливання. Таке поглинання сильно зменшує відстані вимірювання. Сильно вигнуті поверхні також зменшують можливу відстань вимірювання і точність вимірювання, оскільки такі поверхні розсіюють ультразвукові коливання в різних напрямках. Ультразвукові датчики випромінюють імпульс у вигляді широкого конусу, що також обмежує можливість вимірювання відстаней до невеликих об'єктів, тому що зростає рівень перешкод від інших об'єктів. Існує багато різних способів вимірювати відстані до предметів за допомогою оптики. До них відносяться лазерні інтерферометри, датчики з розсіяним відображенням світла і оптичні датчики радарного типу. Кожний з видів датчиків має сильні і слабкі сторони. Лазерні інтерферометри мають великий діапазон вимірювання і точність кілька нанометрів. Провівши аналіз різних типів датчиків був обраний індуктивний датчик. Так як він має ряд властивостей роботи, які необхідні для їх використання у гідростатичних підшипниках.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ КОНІЧНИХ ЗАМКОВИХ НАРІЗЕЙ ІЗ ПІДВИЩЕНИМИ МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

Проблемами забезпечення експлуатаційних характеристик замкових конічних нарізей зайнято значна кількість провідних вчених, у першу чергу із університету нафти і газу [1], [2], [3]. На основі їхніх праць і опираючись на світову практику буріння зроблено висновок про те, що до основних експлуатаційних характеристик замкових нарізових з'єднань входять:

- зносостійкість при багаторазовому згвинчуванні–розгвинчуванні;
- ефективна згвинчуваність і розгвинчуваність;
- високий опір навантаженням розтягу, згину та скручення;
- герметичність.

Отже одна із чотирьох основних експлуатаційних характеристик замкових з'єднань–високий опір механічним навантаженням є тісно пов'язана із проблематикою забезпечення міцності сталей, які застосовують у замкових з'єднаннях.

Стандартом передбачено застосування термообробки для сталі 40ХН з якої зроблено замкове з'єднання. Після термічної обробки для замків бурильних труб межа міцності σ_B повинна бути не меншою 900 МПа, а межа плинності – 750 МПа, твердість нарізи має сягати НВ 285...341.

Проте сучасні виробники дотримуються науково-практичних напрацювань, які рекомендують застосовувати для бурильних замків такі сталі, які належать до наступної групи міцності у порівнянні із групою міцності тіла бурильної труби.

Відзначено, що в загальній кількості відмов бурильних колон із-за впливу навантажень вібраційного характеру 52% складають відмови, які спричинені ослабленням чи зруйнуванням нарізових кінців бурильних труб. Замкові нарізові з'єднання як показують численні дослідження, під дією згинальних та осьових навантажень часто виходять з ладу або через викришування окремих витків нарізи, або через злам конуса. Одним із способів вирішення таких проблем є застосування матеріалів із більш високими механічними властивостями, що дозволяють ефективніше чинити опір згаданим руйнуванням. Для цього слід проаналізувати вимоги щодо механічних властивостей матеріалів які ставлять щодо бурильних труб у цілому і замкових нарізей зокрема, а також розглянути пропозиції, щодо перспективних матеріалів для виготовлення конічних замкових нарізей.

Бурильні замки приварюють до тіла бурильної труби, або пригвинчують до неї. Стандартами [5], [6] передбачено виконання нафтогазових труб та бурильних замків із різних за міцністю груп матеріалів відповідно до умов їх експлуатації та способу буріння: роторного чи турбінного. У таблицю 1 зведено дані, які показують значення механічних властивостей бурильних труб у залежності від групи міцності сталі.

В силу переважаючого поширення роторного способу буріння над турбінним зараз найбільшим попитом користується сегмент високоміцних труб, що займає понад 70% ринку. Такому зростаючому попиту сприяють щораз більші потреби у застосуванні похило–скерованого та горизонтального методів буріння. Тому зірочкою згідно з [5] позначено ті групи сталей, які відзначено як перспективні.

Таблиця 1 – Механічні властивості тіла бурильної труби після термообробки згідно зі стандартом [5]

Назва показника, розмірність	позначення	Норма механічних властивостей за групами міцності сталі						
		Д	Е	Л	М	Р	Т*	У*
Межа міцності, МПа	σ_B	655	689	724	792	999	1104	1241
Межа плинності, МПа: min	σ_T	379	517	655	724	930	1035	1170
max		-	724	862	930	1138	1241	1379
Відносне видовження, % min	δ_5	16	14	14	12	12	11,5	10,5
Відносне звуження після розриву, % min	ψ	50	50	50	45	45	40	40
Ударна в'язкість, Дж/см ²	KSV	690	690	690	690	690	-	-

Проблемним залишається питання обробки сталей групи Т і У. За своєю міцністю їх по суті слід відносити до важкооброблюваних матеріалів, що ставить вельми складні задачі перед виробниками таких замкових з'єднань [7], [8]. Така складність підсилюється закритим процесом різання – тобто коли різальна крайка фактично експлуатується на всій своїй довжині, особливо прикінцевими проходами [9].

Список використаних джерел

1. Борушак Л. О., Онисько О. Р. Вплив величини технологічного зазору замкової нарізи на швидкість потоку бурового розчину у її гвинтовому з'єднанні *Прогресивні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць VII Міжнар. наук.-техн. конф., 5–9 лют. 2018 р. Львів, 2018. С. 24–27.
2. Васишлин В. Я. Геометрична суть і аналітичний опис алгоритмів визначення діаметральної компенсації похибки кроку конічних різбових з'єднань. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(36). С. 59–62.
3. Чудик І. І. До втрат гідравлічної енергії під час промивання свердловини. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2009. № 2(31). С. 34–42.
4. Чернов Б. О., Сімків М. Є., Чернов В. Б. Методи підвищення довговічності елементів бурильної колони. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4(29). С. 91–95.
5. ГОСТ 28487-90. Межгосударственный стандарт. Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль. Размеры.
6. API SREC 7-2. Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connection. [Effective Date June 2011]. First Edition. 125 p
7. Петрина Д. Ю. Вплив характеру навантаження та робочого середовища на довговічність бурильних труб. *Нафтогазова енергетика*. 2012. № 2(18). С. 14–20.
8. Паршин Ю. І. Підвищення ефективності механічної обробки виробів із сталей типу 38ХНЗМФА з підвищеними характеристиками міцності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: 05.03.01. Донецьк, 2000. 24 с.
9. Панчук В. Г., Онисько О. Р., Теліхович Я. В. Профілювання бічного профілю різців для виготовлення високоточної конічної замкової гвинтової нарізи. *Прогресивні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць VI Міжнар. наук.-техн. конф., 6–10 лют. 2017 р. Львів, 2017. С. 97–100.

Pylypenko M.M.¹, Dr. Sc.
Pylypenko1957@gmail.com
Yefimov O.V.², Dr.Sc., professor
AVEfimov@kpi.kharkov.ua
Stadnik Yu.S.¹, junior researcher
Stadnikus@kipt.kharkov.ua

ENHANCEMENT IN THE PROPERTIES OF FUEL CLADDINGS MATERIAL

¹National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, Kharkiv, Ukraine

²National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine

Zirconium alloys have widely been used as the fuel cladding materials in water-cooled nuclear reactors of both pressurized water reactor and boiling water reactors over the past several decades. To achieve better economic and safety performance, higher burn-up fuel designs are required by the industry, and hence the improvement of existing zirconium alloys and the design of new one with longer operating lifetimes in the core.

The Zr-1%Nb alloys are the materials for cladding and structures and used in pressurized water reactors WWERs and provide reliable operation of fuel elements and fuel assemblies in existing reactors and serves as a basis for new modifications. The high corrosion and radiation resistance of zirconium elements is provided by the chemical composition, structure, and phase composition of the alloys. Numerous works [1] have shown that iron (Fe) alloying of zirconium is promising in developing advanced alloys. The increase of Fe content in the zirconium alloy provides the material of the cladding tubes with the required resistance to creep and strengthening under irradiation. In addition, the Fe alloying of the Zr-1%Nb alloy increases its corrosion and radiation resistance in the conditions of the operation of a nuclear reactor.

The aim of this work is to study influence of Fe microalloying on structure and the radiation and corrosion properties of the Zr-1%Nb alloy.

The vacuum-arc melting method was applied to obtain a homogeneous zirconium alloys with Fe micro additives. The obtained samples were contained Fe from 0.012 to 0.192 wt. % with an interval of 0.03 wt. %. The oxygen content in all samples of Zr-1%Nb alloy was 0.1 wt.%.

The properties of alloys are determined by their structural-phase state and even small changes in the composition of Zr-Nb alloys lead to significant changes due to the formation of different types of precipitates and changes in the matrix composition. The kinetics of release of new phases in α -Zr is determined by the composition of the alloy, the degree of supersaturation of the solid solution α -Zr, the composition and the crystal structure of the phases. The alloying elements have a low solubility in α -Zr (0.005-0.02% Fe, $\sim$ 0.5% Nb) and are precipitated as second phase particles with sizes of 50-500 nm. The composition and type of precipitates are determined by the degree of solubility of the main alloying elements (Nb and Fe) in α -Zr and their total content in the alloy.

Metallographic studies of the structure of samples of the Zr-1%Nb alloy with different Fe content showed that the samples have a two-phase structure: α -matrix and precipitates of the second phase. The additional Fe alloying of the Zr-1%Nb alloy leads to the formation of precipitates the density of which increases with increasing Fe content. The study of the chemical composition of particles using the X-ray spectral microanalysis confirmed the presence of two types of precipitates. The Fe content in the matrix is 0-0.1%, Nb – 0.3-0.7%.

The microstructures of the Zr-1%Nb alloy samples are depend on the composition. The fine particles of β -Nb precipitate and a small number of larger precipitates $Zr(Nb, Fe)_2$ (the Laves phases) are present in structure of alloy samples with the Fe content of up to 0.04 wt.%. The concentration of the Laves phases is much lower than of β -Nb particles.

The increasing the Fe content in the alloy to 0.07 wt.% lead to the insignificant increase in the concentration of the Laves phase precipitates. A significant increase in the number of precipitates and their sizes occurs when Fe alloying up to 0.16 wt.% and more. The average size of the β -Nb

precipitates is 40-50 nm. The precipitates of the Laves phase are slightly larger, their average size is 80-100 nm [2]. Due to the low solubility of Fe in α -Zr, almost all of it is concentrated in the Laves phases and number of them significantly depends on the Fe content in the alloy.

The method of autoclaving was used for research, i.e. heating and corrosion tests of samples in an autoclave at a temperature of 350 °C, pressure of 16.5 MPa for a long time. The prepared samples were put to corrosion tests in autoclaves filled with water of a chemical composition similar to the primary coolant in water-water energetic reactor WWER-1000.

Long-term corrosion tests have shown that the corrosion rate of samples with different iron content is different (Fig. 1). It is seen that the lowest corrosion rate have samples of the alloy with an iron content of 0.1 wt.%. Reducing the iron content to 0.012 wt.%, increases the corrosion rate by almost two times, and increasing the iron content to 0.16 wt.% also leads to an increase in the corrosion rate by almost 25% compared to alloy with the iron content of 0.1 wt.%. After long-term corrosion tests, the alloy Zr-1%Nb, which contains 0.1 wt.% Fe, has the highest corrosion resistance compared to all other samples of the alloy. The optimal content of iron, which will increase the corrosion resistance of the Zr-1%Nb alloy under operating conditions in the core of WWER-1000, it is 0.1 wt.% [3, 4].

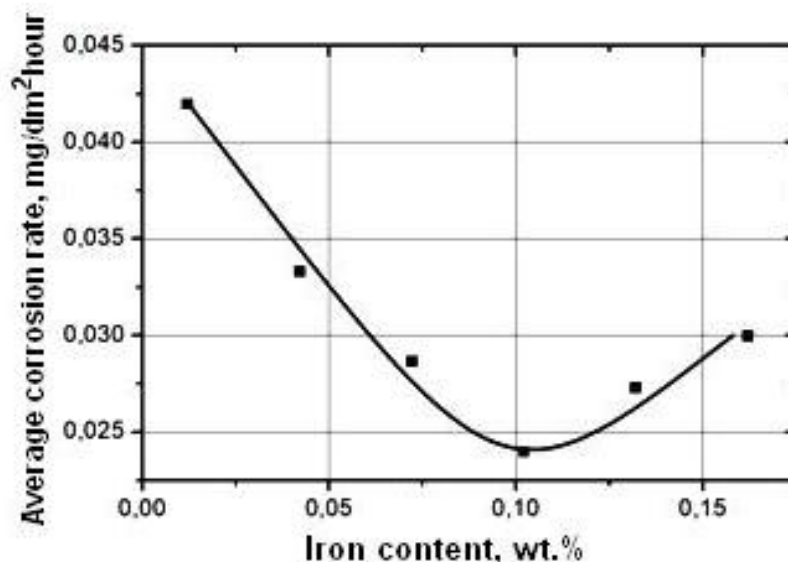


Fig. 1. Dependence of the change in the average corrosion rate of zirconium alloy samples on the iron content for 1500 h of testing

Irradiation experiments were conducted in the accelerating-measuring system “ESU-2” [5]. The samples were irradiated with a 1.4 MeV Ar^{2+} ion beam at irradiation temperature of 390 °C and an irradiation doses 5 and 15 displacement per atom (dpa).

The effect of irradiation with Ar^{2+} ions on the parameters of dislocation loops in Zr-1%Nb alloy with different Fe content was investigated by methods of transmission electron microscopy. Studies have shown that dislocation loops under these conditions have an elliptical shape. In this case, starting from dose of 5 dpa, the loops begin to interact with each other, forming elements of the dislocation network. Up to a dose of 15 dpa, only *a*-type loops are observed, *c*-type loops are not detected. Irradiation of an alloy with Fe additions leads to the formation of radiation-induced *a*-type loops and the formation of a dislocation network due to the interaction of the loops at a dose of 15 dpa.

Studies of the microstructure evolution of Zr-1%Nb alloys with different Fe contents made it possible to reveal the effect of Fe on the processes of formation and development of radiation-induced interstitial dislocation loops. It can be seen from the data obtained that the increase in the Fe concentration leads to a decrease in the size of interstitial dislocation loops and an insignificant increase in their density.

X-ray micro spectral studies of the composition of precipitates in samples of Zr-1%Nb alloys with Fe additions after irradiation to a dose of 15 dpa showed that, the precipitates of the Laves phase contain only 1-8% Fe; the content of Fe in the precipitates of the Laves phase was 30% before irradiation. This indicates the forced infiltration of Fe into the solid solution and its possible participation in the formation of secondary radiation-induced fine precipitates, which retard the formation of c-type dislocation loops responsible for accelerated the radiation growth of the zirconium alloy [5].

The results obtained allow us to conclude that the Fe alloying of the zirconium-niobium system alloys contributes to the suppression of the phenomenon of radiation growth in commercially effective ranges of irradiation doses.

Conclusions. The evolution of the structure of the Zr-1%Nb alloy with increasing Fe content has been studied. It is shown that small Fe additions to the Zr-1%Nb alloy lead to a change its structure due to the formation of precipitates of second phase – the Laves phases.

Long-term corrosion tests of samples of Zr-1%Nb alloy with different Fe content is shown that the optimal content of Fe, which will increase the corrosion resistance of the Zr-1%Nb alloy under operating conditions in the core of WWER-1000, it is 0.1 wt.%.

Under irradiation the Fe, leaving the Laves phase into the matrix, forms secondary fine precipitates and delays the formation of c-type dislocation loops responsible for the acceleration of radiation growth. The Fe alloying of the alloys of the system Zr-Nb contributes to the suppression of the phenomenon of radiation growth in commercially effective ranges of radiation doses.

References

1. M.M. Pylypenko. Research and development for obtaining of nuclear-pure zirconium and alloy on its basis // Problems of Atomic Science and Technology (PAST). 2009, N 6, p. 12-18.
2. M.M. Pylypenko, A.A. Drobyshchanskaya, Yu.S. Stadnik, et al. Effect of iron additives on the properties of Zr1%Nb alloy // PAST. 2018, N 1, p.101-104.
3. M.M. Pylypenko, A.O. Drobyshchanska, V.A. Zuyok. Influence of iron additives on the corrosion resistance of the Zr-1%Nb alloy under operating conditions of a nuclear reactor // PAST. 2022, N 1, p.51-54.
4. O. Yefimov, M. Pylypenko, V. Kravchenko, et al. Improvement in the Properties of Fuel Claddings for the Domestic Nuclear Fuel Cycle // Nuclear and Radiation Safety, 2022, N 3, p.39-47.
5. M.M. Pylypenko, R.L. Vasilenko, A.O. Drobyshchanska. Effect of iron on evolution of the structure of alloy Zr-1%Nb under ion irradiation // PAST. 2022, N 4, p. 49-54.

ДІАГНОСТИКА І АНАЛІЗ РУЙНУВАНЬ ТА ПОШКОДЖЕНЬ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Підшипники кочення (ПК) є ключовим компонентом будь-якої машини і багато в чому визначають її надійність та довговічність. Щорічно у світі виробляється близько 10 мільярдів підшипників. Ряд підшипників (9,5%) замінюють до виходу з ладу з міркувань безпеки (профілактики). Приблизно 0,5% підшипників замінюються, тому що вони пошкоджені або вийшли з ладу. Таким чином, близько 50 000 000 підшипників замінюють щороку через пошкодження та вихід з ладу.

У роботі представлено огляд сучасного стану питання, дана класифікація пошкоджень на базі стандарту ISO 15243 та проаналізовано причини виходу з ладу підшипників, а також розглянуто методи діагностики пошкоджень.

Можливість виявлення відмов та усунення причин пошкодження ПК є першим кроком на шляху запобігання повторним пошкодженням та сприяє підвищенню надійності обладнання. Методи діагностики, що застосовують в даний час, описані в роботах [1–4]. Класифікація пошкоджень ПК дана у роботі [5].

Результати аналізу даних показують [5], що третина підшипників виходять з ладу через втому, ще третина через проблеми з мастилом (неправильний вибір мастильного матеріалу, неправильна її кількість і неправильна періодичність змащування, наявність вологи та інших рідин у мастилі, розшарування мастила та ін.). Одна шоста всіх пошкоджених підшипників виходить з ладу через неефективність ущільнення, ще одна шоста з ряду інших причин (неправильне поводження та монтаж, важче чи інше навантаження, ніж передбачалося, неправильна або невідповідна посадка).

Як показано на рис. 1 застосування прогресивних методів моніторингу стану підшипників дозволяє передчасно виявляти пошкодження підшипників, тим самим виключаючи можливість виникнення катастрофічного руйнування підшипника та виникнення аварійної ситуації. На рис. 2 показано процес розвитку пошкоджень внутрішнього кільця сферичного підшипника у різні моменти часу, пов'язані з точками, які показано на рис. 1.

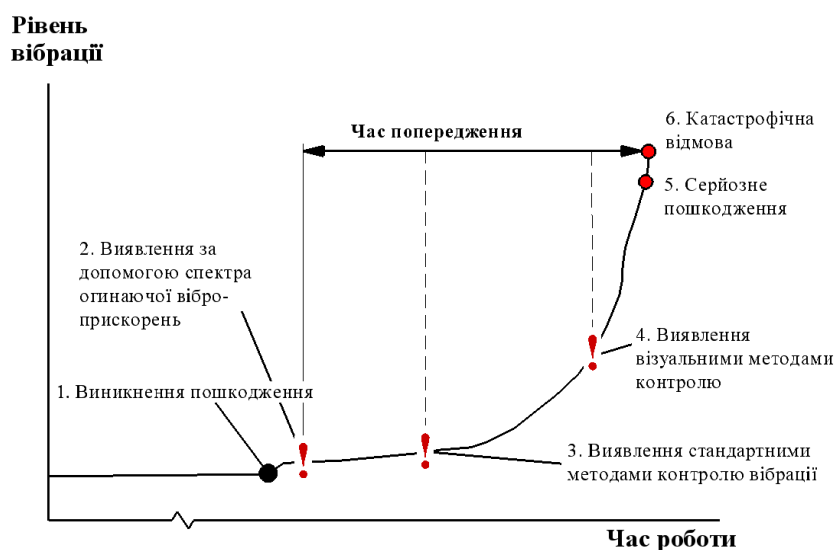


Рис. 1. Переваги застосування прогресивних методів моніторингу



Рис. 2. Процес розвитку пошкоджень внутрішнього кільця підшипника

Перший варіант стандарту ISO 15243 було випущено на початку 2004 року. З того часу накопилися нові знання та розширився досвід щодо ушкоджень ПК в експлуатації. У зв'язку з цим робоча група переглянула та випустила оновлений стандарт ISO 15243 – 2017, який досі залишається основним нормативним документом, в якому наведено класифікацію пошкоджень ПК.

Згідно з чинним стандартом ушкодження ПК, що зустрічаються в експлуатації, ділять на шість видів, а ті в свою чергу поділяють на 14 підвидів. (рис. 3).



Рис. 3. Класифікація пошкоджень ПК згідно з стандартом ISO 15243

1. Контактна втома включає дві підкатегорії: підповерхнева та поверхнева втома. Підповерхнева втома виникає внаслідок впливу на доріжки кочення та тіла кочення циклічних навантажень, що призводять з часом до зміни структури матеріалу та утворення мікротріщин.

Мікротріщини зароджуються в підповерхневому шарі матеріалу та згодом поширюються на поверхню у вигляді сколів. Імовірними причинами даного виду пошкодження є перевантаження та ударне навантаження (рис. 4), неякісний монтаж (не співвісність) (рис. 5), проникнення сторонніх частинок, недостатнє змащування (рис. 6) і невідповідний мастильний матеріал, неправильний зазор у підшипнику, наявність вм'ятин, а також невідповідна точність обробки валу або корпусу, сильний вигин валу.



Рис. 4



Рис. 5



Рис. 6

Поверхнева втома виникає через поверхневі дефекти, які виникають в наслідок поганого змащування або недостатньої чистоти (рис. 7, 8). При досягненні навантаженням і силами

тертя певної величини на поверхні контакту утворюються невеликі тріщини, які згодом перероджуються в мікросколи.

2. Зношування поділяють на дві підкатегорії: абразивне та адгезійне зношування.

Абразивне зношування – процес деградації поверхонь доріжок (рис. 9) і тіл кочення, отворів у сепараторі (рис. 10) та торцевої поверхні роликів (рис. 11), що супроводжується поступовим видаленням матеріалу і призводить до суттєвої зміни початкової геометрії деталей підшипника.



Рис. 7



Рис. 8

Причинами виникнення даного виду пошкодження є недостатнє змащення поверхонь, що труться, потрапляння бруду і твердих абразивних частинок (продукти зносу) в мастило і на доріжки кочення. Характерною ознакою абразивного зношування є тьмянний вигляд поверхні.



Рис. 9



Рис. 10



Рис. 11

Адгезійний знос – це тип пошкодження, пов'язаний зі змащенням і виникає між двома контактними поверхнями за наявності ковзання. Зазвичай супроводжується виділенням тепла внаслідок тертя і може призводити до відпуску та повторного загартування матеріалу. Теплове нагрівання створює локальну концентрацію напружень, що може призвести до утворення тріщин і сколів у зоні контакту. В результаті нагріву також великий ризик мікрозварювання (рис. 12) поверхонь, що контактують, а за наявності ковзання це призводить до утворення борозен і задирів (рис. 13).

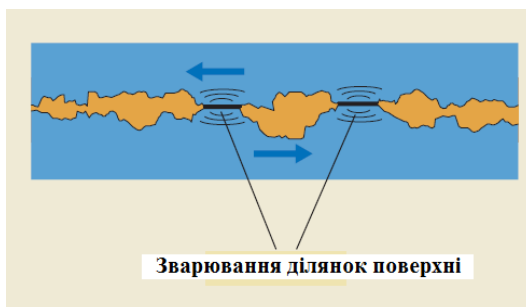


Рис. 12

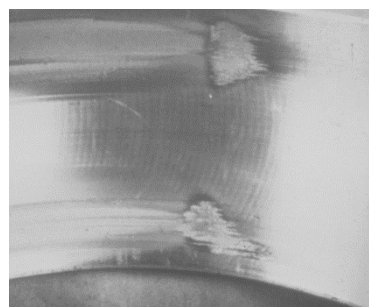


Рис. 13

3. Корозія включає три підкатегорії: корозія внаслідок впливу вологи, фреттинг-корозія та псевдобринелювання. Перший тип корозії є локальним пошкодженням поверхні доріжок і тіл кочення внаслідок попадання води (рис. 14) та інших агресивних речовин.

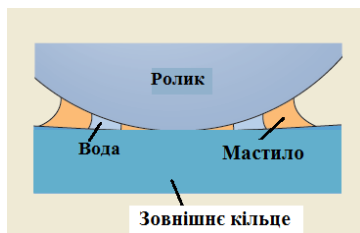


Рис. 14



Рис. 15



Рис. 16

Фреттінг-корозія відбувається внаслідок мікрозміщень контактуючих поверхонь, які періодично повторюються. Можливими причинами виникнення даного виду пошкодження є неправильне встановлення підшипника на вал і корпус, недостатнє змащування, вібрації малої амплітуди або недостатній натяг. Фреттінг-корозія проявляється у вигляді червоно-коричневого окислення в місці сполучення (рис. 16)

Псевдобриннелювання – утворення вибоїн внаслідок зношування, викликаного вібраціями та коливаннями в точках контакту між тілами та доріжкою кочення. (рис. 17, 18).



Рис. 17



Рис. 18



Рис. 19

4. Електрична ерозія виникає через проходження через деталі підшипника високих струмів та внаслідок витоків струму.

У першому випадку при проходженні електричного струму через деталі підшипника (рис. 20 а) через високу щільність струму на малій контактній поверхні відбувається нагрівання матеріалу до температури відпуску і далі до температури плавлення (рис. 20 б). Це веде до появи знебарвлених областей різного розміру, в яких відбувається відпуск, повторне загартування або розплавлення матеріалу. У місцях плавлення утворюються кратери до 0,5 мм (рис. 20 в) з наступними сколами через обертання підшипника (рис. 20 г). Надлишок матеріалу стирається.

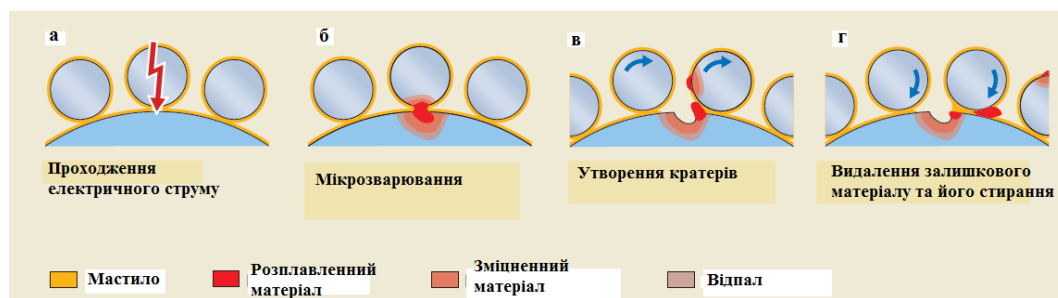


Рис. 20. Механізм ерозії через високий струм

Ерозія через виток струму виникає при проходженні через підшипник струму малої інтенсивності. В цьому випадку виникають пошкодження у вигляді маленьких поруч розташованих кратерів (рис. 21). З часом з'являються сірі ділянки зношеного матеріалу (рис. 22). Тіла кочення стають сірими та тьманими, а мастило знебарвлюється.

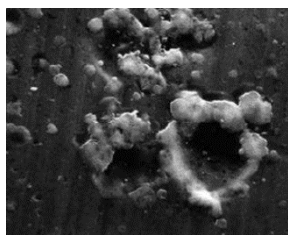


Рис. 21



Рис. 22

5. Пластична деформація включає дві підкатегорії: деформація внаслідок навантаження та вм'ятини через забруднення. Перший вид пошкодження спричинений статичним перевантаженням, ударними навантаженнями або неправильним поводженням. Деформація проявляється у вигляді вм'ятин на доріжках кочення (рис. 23) або борозен на поверхні між тілами кочення, пошкоджень сепараторів (рис. 24), ущільнень та захисних шайб.

6. Тріщини та сколи. Цей вид пошкоджень включає три підкатегорії: тріщини через навантаження, втомні та термічні тріщини. Перший тип пошкоджень виникає у випадках, коли навантаження перевищує межу міцності матеріалу. Імовірними причинами ушкодження є високі значення відцентрової сили, посадки із надмірним натягом (рис. 25), ударні навантаження (рис. 26), помилки монтажу та перекоси (рис. 27).



Рис. 23



Рис. 24

Втомне розтріскування відбувається при перевищенні межі витривалості під дією циклічного вигину, що призводить до виникнення тріщин у кільці (рис. 28, 29) або сепараторі.



Рис. 25



Рис. 26



Рис. 27

Внаслідок ковзання поверхонь виділяється тепло, що у свою чергу призводить до виникнення термічних тріщин. (рис. 30). Вони розташовані під прямим кутом до напрямку ковзання.

Раннє виявлення пошкоджень підшипників дозволяє користувачеві уникнути дорогих незапланованих простоїв машини, а також передчасно запобігти виникненню аварій через несправність підшипників.



Рис. 28



Рис. 29



Рис. 30

Важливими параметрами для моніторингу стану машини є шум, температура та вібрація. Найкращим способом виявлення симптомів пошкодження та вживання превентивних заходів на ранніх стадіях є створення програми моніторингу стану підшипників в експлуатації.

Найбільш важливим є не просто вміння виявляти та класифікувати види несправностей ПК, а розуміння причин виникнення пошкоджень.

Симптоми, що свідчать про неполадки ПК, можна звести до кількох категорій: а) перегрів; б) підвищений рівень шуму; в) підвищений рівень вібрацій; г) надмірний люфт валу; д) надмірний момент тертя при обертанні валу. У свою чергу кожен із перелічених симптомів викликаний певними причинами.

При обслуговуванні підшипників застосовують один із підходів: реактивний, профілактичний та предиктивний. Класифікація та аналіз причин ушкоджень, розглянутих у стандарті ISO 15243 [5], головним чином базується на методах візуального та неруйнівного контролю.

Серед методів неруйнівного контролю поширені методи вібродіагностики: 1. метод ПК-фактору, 2. метод прямого спектру, 3. метод спектру огинаючої віброприскорень, 4. метод ударних імпульсів.

Для вимірювання та моніторингу температури підшипників кочення застосовують два типи датчиків: 1. резистивний датчик температури та 2. термопару. Кожен із датчиків має свої специфічні особливості: конструкцію, технічні характеристики, сферу застосування та умови експлуатації.

Одним із ключових параметрів, що визначає якість мастила, є шумність підшипника. Компанія SKF – світовий лідер з виробництва підшипників, розробила тестер шумності мастила SKF Grease Test Rig BeQuiet+ [6]. Причиною виникнення шуму в підшипнику є мала товщина плівки мастила (зазвичай менше мікрона) в точці контакту і будь-яка частка великого розміру, що потрапила в мастило, заважатиме плавному руху тіл кочення. Великі частинки, потрапляючи в мастило, залишають сліди на доріжках кочення. Перенесення дрібніших частинок, які кришаться, викликає дрібні пошкодження. Компанія запропонувала для характеристики якості мастила чотири класи: брудний, шумний, чистий та тихий. Для брудних мастил характерна наявність у мастилі великих твердих частинок, перенесення яких викликає стійкі пошкодження контактних поверхонь і підвищує шумність підшипника, знижуючи його ресурс. Розмір і твердість частинок шумних мастил, такі, що вони можуть призводити до пошкодження контактних поверхонь, підвищуючи при цьому шумність, але не знижуючи при цьому ресурсу підшипника. Твердість і розмір частинок, що переносяться в чистих мастилах, викликає помітні вібраційні піки без стійких пошкоджень контактних поверхонь підшипника. Високий рівень чистоти тихих мастил не призводить до виникнення вібраційних піків.

Таким чином, метою розробки тестера BeQuiet+ є визначення якості мастила відповідно до прийнятих класів чистоти, щоб розробляти, покращувати або виявляти тихі мастила.

У плані підвищення оперативності та ефективності систем обслуговування ПК привабливим є застосування штучного інтелекту для вирішення задач діагностики та запобігання можливим пошкодженням в експлуатації. Дані системи є практичним прикладом реалізації профілактичного та передиктивного підходів. В даний час відомий ряд рішень задачі автоматизації діагностики технічного стану ПК, які реалізовано у комерційних системах: 1. ABB Ability™ Smart Sensor [7], 2. Amazon Monitron and Amazon Lookout for Vision [8], 3. IBM

Maximo® Application Suite [9], 4. NSK Bearing Doctor [10], 5. рішення від компанії NTN (Sensor Integrated Bearing, Talking Bearing™ [11], Wind Doctor™) та інші.

Висновки:

У роботі обґрунтовано переваги застосування прогресивних методів діагностики, які дозволяють виявляти пошкодження ПК на ранніх стадіях, дана класифікація пошкоджень на базі стандарту ISO 15243, проаналізовано причини їх виникнення та розглянуто методи діагностики пошкоджень. Застосування діагностичних систем на базі штучного інтелекту дозволяє підвищити оперативність та ефективність даних систем.

Список використаних джерел

1. Nastasi, Guilio. AI-Based Predictive Maintenance Technique for Bearings: Emerging Research Trends and Engineering Solutions, 2024 – 76 p.
2. Said, Ali. Bearing Fault Detection Scheme Using Machine Learning for Condition Monitoring Applications / Ali Said, Ali Usman, Saad Arif, Marcus Lewicki, *Proc. of the International Conference on Mechanical, Automotive and Mechatronics Engineering (ICMAME 2023) 29-30 April 2023, Dubai, UAE*.
3. SKF Bearing Maintenance handbook – Режим доступу: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968013be94/pdf_preview_medium/0901d1968013be94_pdf_preview_medium.pdf – 01.06.2025 p.
4. Зубенко, Д. Техническая диагностика подшипников качения подвижного состава городского электротранспорта / Восточно – европейский журнал передовых технологий 4/7 (52) 2011 – с. 6 – 8.
5. Bearing Damage and Failure Analysis – Режим доступу: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968064c148/pdf_preview_medium/0901d1968064c148_pdf_preview_medium.pdf – 01.06.2025 p.
6. SKF Grease Test Rig BeQuiet+ – Режим доступу: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196801a573a/pdf_preview_medium/0901d196801a573a_pdf_preview_medium.pdf – 02.06.2025 p.
7. ABB Ability™ Smart Sensor. User guide for Smart Sensor Platform app and web portal – Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/80d80b6b23ba49dda329b62a82f2fd46/9AKK107045A8954_ABB%20Ability%20SmartSensor_user%20guide_RevF.pdf – 02.06.2025 p.
8. What is Amazon Monitron? – Режим доступу: <https://docs.aws.amazon.com/Monitron/latest/user-guide/what-is-monitron.html> – 02.06.2025 p.
9. Продукты Maximo для прогностического обслуживания. – Режим доступу: <https://csc-ua.com/predictive-maintenance/> – 02.06.2025 p.
10. NSK Bearing Doctor Apps – Режим доступу: <https://www.nsk.com/eu-en/tools-resources/technical-services/apps/> – 02.06.2025 p.
11. Development of Sensor Integrated Bearing “Talking Bearings™” – Режим доступу: https://www.ntnglobal.com/en/products/review/pdf/NTN_TR89_en_05.pdf – 02.06.2025 p.

АНАЛІЗ РОБОТИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ АВІАЦІЙНИХ РЕДУКТОРІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В авіаційних редукторах поряд з планетарними застосовують диференціальні механізми, які дозволяють вживати більш потужні двигуни для обертання співвісних гвинтів (рис. 1). Диференціальний механізм має два ступені рухомості, що дозволяє підвести потужність до його вхідного валу та роздати її на два вихідні вали для привода до руху двох співвісних гвинтів, які обертаються в різні боки з однаковою кутовою швидкістю. Передній гвинт обертається водилом (H), задній центральним колесом (z_4). Кінематичні схеми редукторів для літаків і вертольотів мають певні відмінності.

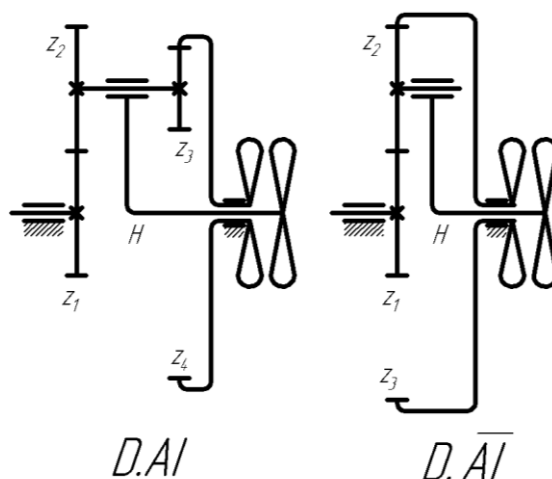


Рис. 1. Диференціальні планетарні механізми

В турбогвинтових двигунах (ТГД) літаків редуктор складається з диференціального механізму типу $D.AI$ (редуктор двигуна НК-12М) або $D.AI-$, у схемі якого $z_2 = z_3$, (редуктор двигуна Д27). Передатне число редуктора типу $D.AI$ $u < 20$, у редуктора $D.AI-$ $u < 12$.

Диференціальний механізм являє собою динамічну систему, у якій кутові швидкості вихідних валів залежать від співвідношення значень корисного навантаження на них.

Зв'язок кутових швидкостей центральних ланок z_1, z_4, H диференціального механізму типу $D.AI$ або $D.AI-$ визначається формулою Вілліса

$$\omega_1 = \omega_4 i_{14}^{(H)} + \omega_H i_{1H}^{(4)}. \quad (1)$$

При $\omega_4 = -\omega_H$ передатне число механізму

$$i_{1(H,4)} = \pm \left(1 - 2i_{14}^{(H)} \right) = \pm \left(1 + 2 \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \right). \quad (2)$$

Крім рівняння (1) працездатність диференціального механізму забезпечується умовою рівноваги крутних моментів

$$\sum_{i=1}^3 T_i = T_1 + T_4 + T_H = 0 \quad (3)$$

та рівнянням балансу потужностей – закон збереження енергії

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_4 + P_H + P_{\text{втрат}} = 0. \quad (4)$$

При $P_{\text{втрат}} = 0$ отримуємо рівняння балансу потужності

$$T_1 \omega_1 = T_4 \omega_4 + T_H \omega_H = T_1 i_{14}^{(H)} \omega_4 + T_1 i_{1H}^{(4)} \omega_H. \quad (5)$$

Враховуючи, що $i_{1H}^{(4)} > i_{14}^{(H)}$, щоб забезпечити рівність кутових швидкостей переднього та заднього гвинтів ($\omega_4 = -\omega_H$), необхідно підвести до водила H крутний момент T_H більший за величиною, ніж до колеса z_4 ($T_H > T_4$). Для цього у ТГД обидва гвинти роблять змінного кроку та встановлюють два регулятора обертів, які підтримують співвідношення $\omega_4 = -\omega_H$ (редуктор двигуна НК-12М), або на заданому гвинту встановлюють менше лопатей ніж на передньому (редуктор ТГД Д-27).

Різниця крутних моментів на передньому і задньому гвинтах дорівнює T_1 – крутному моменту на вихідному валу диференціального редуктора. Редуктори вертольотів з співвісними гвинтами мають більш складну кінематичну схему, до складу якої входять також зубчасті передачі з нерухомими осями. В таких редукторах потужність підводиться, як правило, від двох ГТД, а далі в редукторі ці потужності об'єднуються на вхідному валу тихохідної ступені диференціального механізму. Потужність далі розподіляються на два вихідні вали для привода двох співвісних гвинтів. Передатне число такого редуктора $u_{ред} = 80...100$, за такою ж кінематичною схемою виконано редуктор РВ-3Ф та інші. На практиці, щоб забезпечити рівність модулів кутових швидкостей ($\omega_4 = -\omega_H$), а також рівність потужностей ($P_4 = P_H$), в диференціальний механізм вертольотного редуктора вводять додатковий замикальний зубчастий механізм, утворений двома зубчастими передачами (переборами). У редуктора РВ-3Ф (рис. 2) число переборів $k_H = 6$, число сателітів $k = 6$.

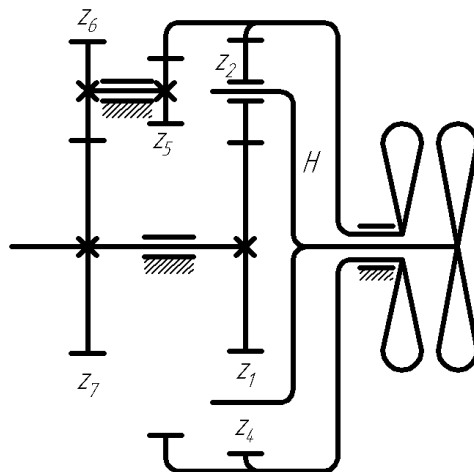


Рис. 2. Замкнений диференціальний механізм.

Замикаючий механізм може зв'язувати між собою передній та задній гвинти, або вхідний вал диференціального механізму з переднім (заднім) гвинтом. У редукторі РВ-3Ф замикаючий механізм кінематично зв'язує вхідний вал з колесом z_4 , яке обертає задній гвинт. Використання замикаючого механізму спрощує керування повітряними гвинтами. Разом з тим застосування замикаючого механізму для забезпечення рівності модулів кутових швидкостей перетворює динамічно зрівноважену систему на жорстку систему з кінематичним замиканням. Такі диференціальні механізми називають замкненими.

Список використаних джерел

Основи проєктування механічних вузлів авіаційно-космічної техніки [Текст]: навч. посібник / В. М. Доценко, В. М. Павленко, Ю. В. Ковеза та ін. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2013. – 328 с.

БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

¹Національний транспортний університет, Київ, Україна

²Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

У автомобілебудуванні, суднобудуванні, залізничному машинобудуванні широко використовуються відповідальні деталі, які повинні мати зносостійкість та міцність в умовах високих тисків, навантажень і температур (патрубки, втулки, плунжерні пари, колісні пари, елементи підшипників тощо). Збільшення вантажопідйомності на осьове навантаження вантажних вагонів може бути досягнуто шляхом збільшення осьового навантаження до 25 тонн, використання нових конструктивних рішень, а також за рахунок використання нових конструкційних матеріалів з підвищеною міцністю.

Одним із найяскравіших представників таких сталей є сталь 09Г2С. Перевагою цієї сталі є те, що вона не схильна до крихкості при відпуску, що, у свою чергу, дозволяє використовувати широкий діапазон температур відпуску. На сьогоднішній день найбільш широко для несучих конструкцій автомобілів використовується низьколегована сталь марки 09Г2С згідно з ДСТУ 8541:2015 Прокат підвищеної міцності. Технічні умови [1].

Головна ідея дослідження виникає в тому, щоб під час прогнозування до уваги приймали концепцію спрямованого хімічного зв'язку металу, що пов'язує між собою їх склад, структуру і властивості металу. Дана концепція доповнена елементами оптимізації хімічного складу, за критерієм стабілізації механічних властивостей, методами планування експериментів. Завдяки чому були отримані інтервали варіювання основних критеріальних показників оптимізації.

На підставі математичного та фізико-хімічного моделювання вивчено вплив легуючих елементів (хром, молібден, ванадій) на формування механічних властивостей сталі. Визначено інтервали вмісту легувальних елементів, що забезпечують виконання необхідних норм. Побудовано залежності зміни механічних властивостей легованого прокату від показника структурного стану d . Перетин функцій властивостей середньовуглецевих сталей у ділянці евтектоду відповідає положенням закону Н.С. Курнакова і дає змогу прогнозувати рівень і поєднання властивостей та характеристик сплавів [2]. В таблиці 1 та 2 наведені оптимальні параметри сталі, отримані за критерієм стабілізації механічних властивостей, та їх порівняння зі зразками, що відповідають ДСТУ.

Таблиця 1 – Оптимізований хімічний склад сталі 09Г2С, мас.% [2].

Різновід Хімічний склад	Масова частка елементів % мас.							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
Оптимальний	≤0,091	≤0,23	≤1,71	≤0,027	≤0,027	≤0,201	≤0,009	≤0,007
ДСТУ 8541:2015	≤0,12	0,17- 0,37	1,4-1,8	≤0,3	≤0,3	≤0,3	-	-

Таблиця 2 – Механічна міцність сталі 09Г2С, високого хімічного складу після нормалізації в промислових умовах та оптимізації за критерієм стабілізації механічної міцності. [2,3].

Механічна потужність стала важливим критерієм блискучості						
	σ_B , МПа	Q(σ_B)	σ_T , МПа	Q(σ_T)	δ %	П(δ)
Оптимальний	750 (56)	0,95	570 (65)	0,98	21	-
ДСТУ 8541:2015	≥ 480	-	≥ 345		≥ 21	-
У дужках () – стандартне відхилення						

Використовуємо математичне моделювання параметрів мікроструктури сталі 09Г2С зоптимальним складом згідно даних таб 1-2 в процесі термічного навантаження з використанням моделі Джонсона Мела-Аврамі-Колмогорова.) [3,4].

Чисельний аналіз проводився на основі програмного пакету JMatPro, який використовує метод термодинамічного розрахунку рівноважного стану системи CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) [5].

Фази при рівноважній кристалізації сплаву показали результати, представлені на (рис. 1.) Згідно з отриманими даними встановлено, що температура початку кристалізації оптимізованої сталі 09Г2С $T_L = 863^\circ\text{C}$, а температура кінця рекристалізації $T_S = 687^\circ\text{C}$. Отримані результати узгоджуються з даними, представленими в роботі [6].

Можливості програми JMatPro дозволяють побудувати термокінетичні (SST) та ізотермічні (TTT) діаграми стану досліджуваних металів. На рис. 2 та 3 наведені розрахункові діаграми для сталі 09Г2С, які побудовані від температури нижче температури аустенізації 884°C . При розрахунку програма враховує, що при цій температурі аустенітна фаза вже присутня.

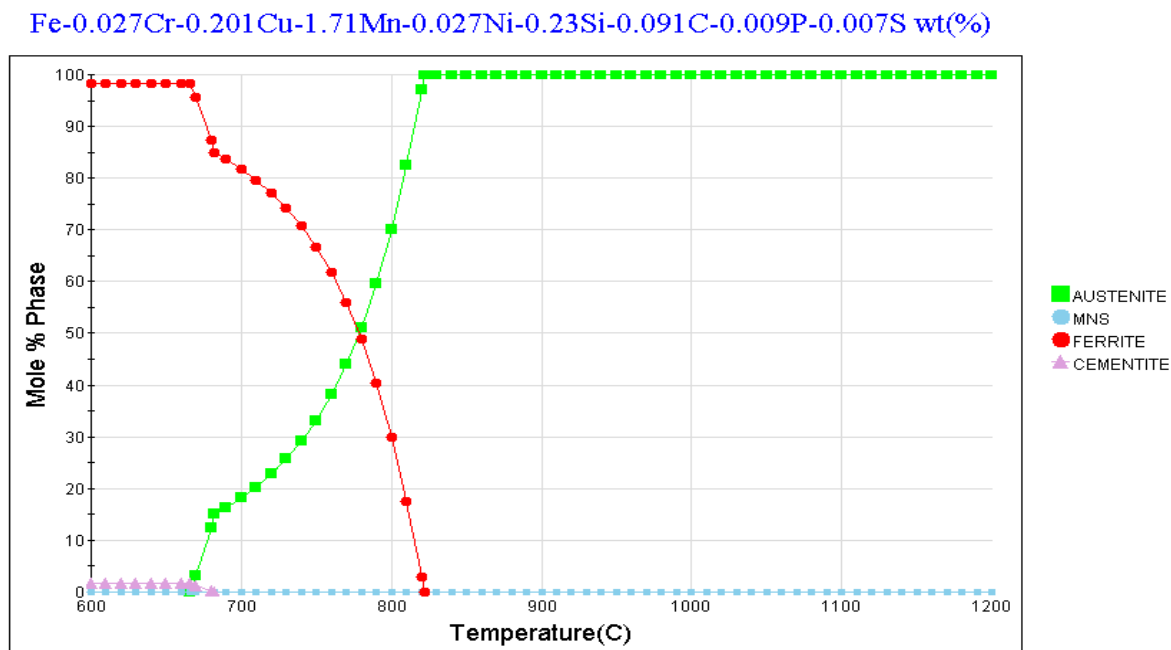
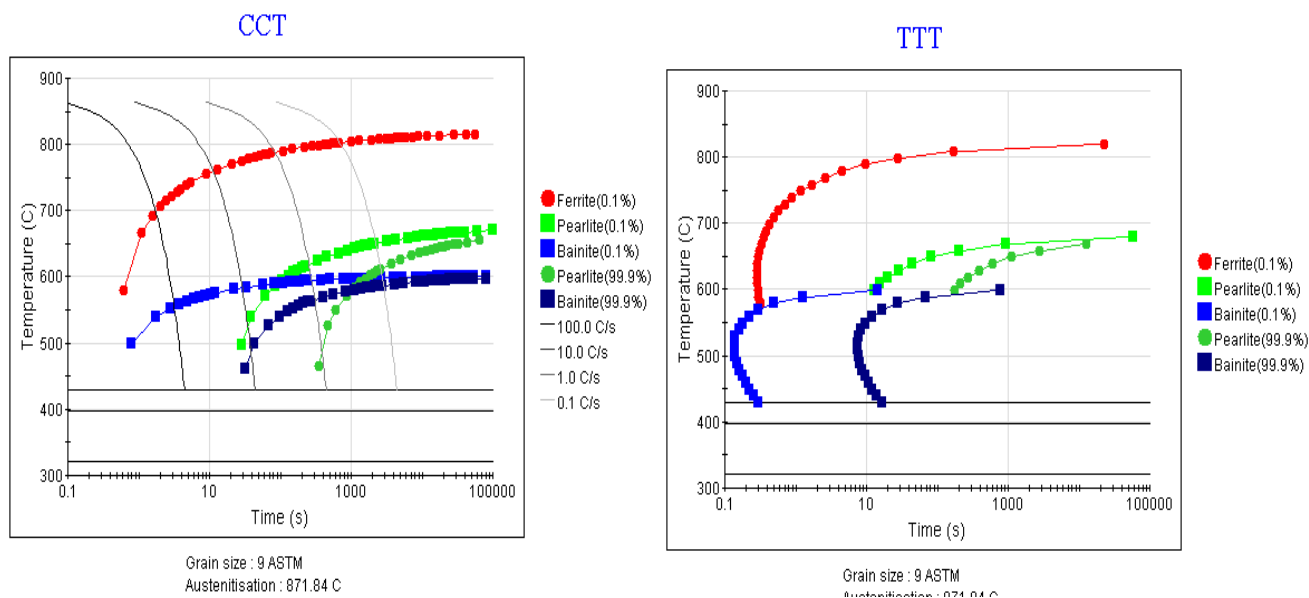


Рис. 1. Термокінетичний розрахунок фазового складу оптимізованого сталі 09Г2С у рівноважному стані.



Термокінетична діаграма (а) та діаграма ізотермічного перетворення (б)
Рис. 2. Термокінетична діаграма розпаду аустеніту та діаграма ізотермічного перетворення оптимізованої сталі 09Г2С

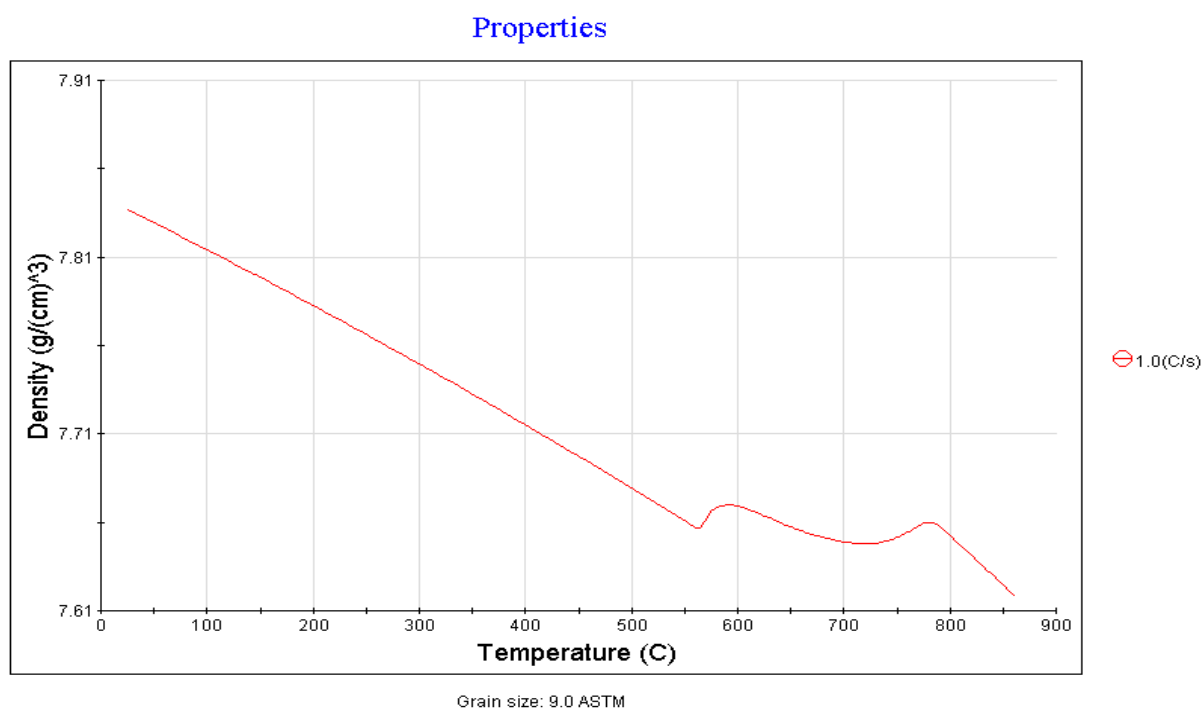


Рис. 3. Розрахунок щільності оптимізованого складу сталі 09Г2С

Обґрунтований оптимізований вибір основних елементів хімічного складу сталі 09Г2С за критерієм стабілізації механічних властивостей, головний критерій та функціональні обмеження, а також обрана технологія проведення оптимізаційного дослідження дозволили здійснити пошук таких значень. Оптимальне значення механічні властивості $\sigma_b = 750$ МПа, $\sigma_T = 600$ МПа, що також підтверджується, чисельний аналізом який проводився на основі програмного пакету JMatPro.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови
2. Fomin. O.V., Burlutskyi O.V., Voronko I., Bursuk O., Kozachuk O., (2025) Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties, Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University" Volume 15 № 1 pp.10-17. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-1>
3. Fomin. O.V., Burlutskyi O.V., Cherkashin O.P., Rodionov I.V., (2025) Study of mathematical models changes in the structure of steel of engineering structures after thermal loading, Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences. Volume № 41, P.7-15. <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2025-41-01>
4. Fomin. O.V., Burlutskyi O.V., Tretyak V., Zelenskyi O., Lisnychiy V., (2025) Evolution of the microstructure of steel in freight carrier loading systems depending on carbon content after thermal loading Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi national university. Kremenichuk: KRNU. Volume 2/2025 (151). pp. 106-112. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.12>
5. Saunders N., Guo Z., Li X., Modownik A.P., Schillé J-Ph. Using JMatPro to Model Materials Properties and Behaviour. JOM, 55.2003. № 12. 60-65 p.
6. Целиков А.І., Полухін П.І., Гребеник В.М., Ф.К. Іванченко, М.А. Тилкін, В.І. Зюзін. Машинаи та агрегати для виробництва та оздоблення прокату, М.: Металургія, 1987. 480 с.

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ НЕЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ МАШИННОГО АГРЕГАТУ З ДВОВАЛЬНИМ ДИЗЕЛЕМ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вступ. Збільшення потужності та швидкохідності сучасних установок з ДВЗ неминуче веде до підвищення динамічних навантажень, коли все більшою мірою виявляються пружні властивості їх деталей та вузлів. Аналіз і усунення небезпечних крутильних коливань, які нерідко визначають міцність і надійність конструкції, вимагає при побудові моделей з одного боку урахування технологічних нелінійностей, а з іншого – введення пружних муфт і демпфуючих пристроїв, характеристики яких найчастіше також є нелінійними. Зазначені фактори на сталих динамічних режимах породжують зміщення резонансів, деформування резонансних кривих, багатозначність коливань, що істотно ускладнює розв’язання задач аналізу і тим більше синтезу для багатомасових моделей машинних агрегатів з ДВЗ. Методи їх розв’язання нині розроблені недостатньо. У доповіді запропоновано метод параметричного синтезу нелінійних моделей машинних агрегатів з ДВЗ.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. У багатьох роботах, присвячених синтезу параметрів машинних агрегатів, вказується на те, що основною мірою їх динамічних якостей є рівень динамічної навантаженості силової передачі. Для аналізованих систем важливою є проблема вібраційного синтезу при сталих коливаннях [1, 2], розв’язанню якої присвячено значну кількість публікацій. Огляд численних методів оптимізації показує, що є безліч ефективних методів розв’язання різних оптимізаційних задач [3, 4]. Разом з тим, застосуванню ефективних численних методів оптимізації до задач синтезу нелінійних моделей силових передач не приділяється належної уваги.

Проведений аналіз існуючих методів розв’язання задач синтезу показує, що в переважній більшості вони орієнтуються на лінійні моделі. Це зумовлено як трудомісткістю аналізу нелінійних моделей, так і специфічними властивостями динамічних процесів у них. Необхідне урахування нелінійних ефектів реалізується лише на рівні частинних оптимальних розв’язків задач синтезу. Тому створення ефективних методів розв’язання задач синтезу нелінійних моделей силових передач машин є актуальною задачею.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є розробка методу параметричного синтезу нелінійних моделей машинних агрегатів з ДВЗ з багатозначною цільовою функцією. Для досягнення поставленої мети повинні бути розв’язані наступні задачі: розроблено ефективний алгоритм розв’язання задач аналізу, що використовує гармонічну лінеаризацію для інтегральних рівнянь руху, записаних за допомогою імпульсно-частотних характеристик (число рівнянь дорівнює числу нелінійностей і трудомісткість розв’язання задачі практично не залежить від числа степенів вільності моделі, що має принципове значення для розв’язання задач синтезу та оптимізації); здійснено оптимальний синтез параметрів моделі для зниження динамічних навантажень; зіставлені результати розрахункових досліджень із даними експериментів.

Формулювання задачі динамічного синтезу нелінійних моделей машинних агрегатів із ДВЗ. Задача динамічного синтезу машинного агрегату полягає у визначенні параметрів, що забезпечують обрані динамічні критерії якості при урахуванні обмежень, що накладаються на параметри, які варіюються. Схема отримання оптимального розв’язку виглядає наступним чином: задається вектор варіюваних параметрів, обчислюється цільова функція і обмеження задачі, для чого один або кілька разів розв’язується задача аналізу, потім

процедура оптимізації так змінює вектор параметрів, що варіюються, щоб наступне значення цільової функції стало в якомусь сенсі “краще”. І так доти, доки не буде знайдено оптимум цільової функції. Особливістю задач оптимізації в нелінійній динаміці машин є громіздкість і трудомісткість розв’язання задач аналізу, тому надзвичайно актуальним є мінімізація часу їх розв’язання, а також вибір раціональних з точки зору швидкодії алгоритмів оптимізації.

Математично задачу динамічного синтезу можна сформулювати як задачу нелінійного програмування в такий спосіб. Варіюючи вектор параметрів $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_l]^T$ моделі, який включає і параметри нелінійностей, необхідно домогтися того, щоб максимальне значення деякого функціоналу $U(\mathbf{x}, \omega)$ в заданому частотному діапазоні Ω зміни частоти ω зовнішніх періодичних моментів стало мінімальним

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \max_{\omega \in \Omega} U(\mathbf{x}, \omega), \quad (1)$$

де $\Omega = \{\omega \mid \omega^* \leq \omega \leq \omega^{**}\}$; X – область пошуку допустимих розв’язків, що задається у вигляді лінійних

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad x_i > 0 \quad (i=\overline{1, l}) \quad (2)$$

та нелінійних

$$G_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (i=\overline{l+1, m}) \quad (3)$$

обмежень відносно параметрів, що варіюються; a_i і b_i – найменше і найбільше значення i -го параметра x_i , що варіюється.

Для коректне поставленої задачі оптимізації повинні бути відомі: задача аналізу; критерій якості (цільова функція), згідно з яким одна сукупність параметрів, що варіюються, порівнюється з іншою; область варіювання параметрів; алгоритм відшукування екстремуму критерію якості та відповідних йому параметрів системи.

Оскільки метою динамічного синтезу є зниження динамічних навантажень валопроводу, то для визначеності в якості цільової функції будемо брати максимальне за частотою значення амплітуди пружного моменту на найбільш навантаженої j -ї ділянці аналізованої системи

$$F(\mathbf{x}, \omega) = \max_{\omega \in \Omega} A_{M_j}(\mathbf{x}, \omega). \quad (4)$$

Таким чином, визначення цільової функції зводиться до розрахунку сталих змусених коливань в нелінійній системі в заданій області частот збудження і знаходження максимального за частотою пружного моменту. У загальному випадку функція A_{M_j} є мультимодальною і для визначення її максимуму на відрізку $[\omega^* \leq \omega \leq \omega^{**}]$ необхідно застосовувати методи глобального пошуку екстремуму. Добре зарекомендував себе з цією метою алгоритм глобального пошуку [1]. При цьому повинна бути врахована можливість появи багатозначних розв’язків, характерних для нелінійних систем, тобто визначення максимального за частотою пружного моменту може вимагати знаходження екстремуму багатозначної функції.

Особливість конструкцій силових передач дозволяє при розв’язанні задач синтезу в досить широких межах варіювати пружні характеристики з’єднувальних елементів за рахунок зміни їх розмірів. Зміна ж моментів інерції має небажано з конструктивних міркувань, і навіть зовсім неможливо, якщо йдеться про приведені маси споживачів [3]. Тому під параметрами системи, що варіюються, будемо розуміти жорсткості лінійних пружних ділянок, параметри нелінійних пружних муфт і демпферів.

Метод гармонічної лінеаризації для рівнянь руху в інтегральній формі. Розв’язання задач аналізу для розглянутих моделей є трудомісткою математичною операцією, що пояснюється великою розмірністю досліджуваних систем, наявністю в них кількох

нелінійностей, багатозначністю розв'язків тощо. У динаміці машин широке поширення отримав метод гармонічної лінеаризації, який дозволяє наближено визначати розв'язок з прийнятною для практики точністю у разі моногармонічного збудження, якщо тільки система має резонансні або фільтруючі властивості [4]. На сталих режимах для аналізованих систем найбільшу небезпеку якраз і представляють такі резонансні і навколорезонансні режими роботи. В основі методу лежить припущення, що при гармонічному збуренні зміни координат, що визначають положення системи, мають характер, близький до гармонічного. Це дає можливість здійснювати лінеаризацію нелінійних з'єднань. Еквівалентний коефіцієнт жорсткості вибирається з умови рівності амплітуди основної гармоніки пружного моменту в нелінійному та амплітуди гармонічного моменту у лінеаризованому з'єднанні. Коефіцієнт виявляється залежним від амплітуди деформації нелінійного з'єднання. Завдяки такому підходу розрахунок коливань на даній частоті зводиться до розв'язання системи нелінійних рівнянь, частина з яких можуть бути і лінійними. Число останніх визначається розмірністю лінійних контурів моделі. При розв'язанні систем нелінійних рівнянь трудомісткість розв'язання задачі суттєво залежить від порядку системи, що завжди робить доцільним його зменшення. Природним є послідовне виключення лінійних рівнянь. Однак поширення методу на довільні дискретні системи з кількома нелінійностями важко через його невисоку алгоритмічність. При багаторазовому розв'язанні задач аналізу надзвичайно важливо мати економічну форму цього методу. Таку можливість надає використання нелінійних інтегральних рівнянь, записаних за допомогою імпульсно-частотних характеристик (ІЧХ). Скористаємося ідеєю методу гармонічної лінеаризації для наближеного розв'язання зазначених рівнянь.

Рівняння руху. У матричній формі рівняння записуються у вигляді [3]:

$$\mathbf{y}(t) = \int_0^T \Phi(t-\tau) \mathbf{f}(\mathbf{y}) d\tau + \mathbf{g}(t), \quad (5)$$

де $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_s(t)]^T$ – вектор деформацій нелінійних з'єднань (t – знак транспонування); $\mathbf{f}(\mathbf{y}) = [f_1(y_1), \dots, f_s(y_s)]^T$ – нелінійна вектор-функція, причому

$$f_j(y_j) = c_j y_j - F_j(y_j) \quad (j = \overline{1, s}); \quad (6)$$

$F_j(y_j)$ – нелінійна характеристика j -го нелінійного з'єднання; c_j і $c_j y_j$ – коефіцієнт жорсткості і лінійна частина пружного моменту в ньому (вибирається довільно в досить широких межах [2]); $\Phi(t-\tau) = [\varphi_{ij}(t-\tau)]$ ($i, j = \overline{1, s}$) – матриця ІЧХ лінеаризованої моделі, у якій нелінійні з'єднання замінені лінійними з коефіцієнтами жорсткості c_j ; $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), \dots, g_s(t)]^T$ – вектор-функція реакцій лінеаризованих нелінійних з'єднань на зовнішнє збудження;

$$g_j = \sum_{i=1}^k \int_0^T \psi_{ji}(t-\tau) M_i(\tau) d\tau; \quad (7)$$

$M_i(\tau)$ ($i = \overline{1, k}$) – збурюючі моменти; $\psi_{ji}(t-\tau)$ ($i = \overline{1, k}; j = \overline{1, s}$) – ІЧХ від i -ої маси до j -го лінеаризованого з'єднання; k – кількість збурювальних моментів; T – період коливань.

Метод гармонічної лінеаризації. Як і при традиційному підході, вважаємо, що розв'язки нелінійних інтегральних рівнянь при моногармонічному збуренні з достатньою точністю описуються виразами

$$y_j(t) = A_j^0 + A_j^c \cos \omega t + A_j^s \sin \omega t \quad (j = \overline{1, s}), \quad (8)$$

де A_j^0 – середня деформація; A_j^c , A_j^s – відповідно косинусна і синусна амплітуди основної гармоніки деформації j -го нелінійного з'єднання [2];

$$\varphi_{ji}(t) = \varphi_{ji}^0 + \sum_{l=1}^{\infty} (\varphi_{ji}^c \cos l\omega t + \varphi_{ji}^s \sin l\omega t) \quad (j, i = \overline{1, s}). \quad (9)$$

При сталих коливаннях періодичними будуть і функції $f_i(y_i(\tau))$ ($i = \overline{1, s}$); їх, отже, також можна представити рядами Фур'є

$$f_i(y_i(\tau)) = f_i^0 + \sum_{l=1}^{\infty} (f_{il}^c \cos l\omega \tau + f_{il}^s \sin l\omega \tau) \quad (i = \overline{1, s}). \quad (10)$$

Після перетворення j -го рівняння системи рівнянь (5), отримаємо рівняння для знаходження A_j^0 , A_j^c , A_j^s .

Динамічний синтез нелінійних систем із багатозначною цільовою функцією. Пропонується наступний метод визначення максимальних за частотою пружних моментів, відповідних верхнім гілкам стійких розв'язків в області багатозначності АЧХ, який повинен бути включений в алгоритм розв'язання задачі аналізу при розв'язанні оптимізаційної задачі (1)÷(3). Спочатку визначаємо наближене значення амплітуди коливань закрутки нелінійної ділянки, відповідної верхньої стійкої гілки АЧХ. Задаємо початкове наближенням A_0 , яке перевищує максимально можливі значення амплітуд коливань (їх оцінка робиться попередньо) для даного з'єднання в аналізованому діапазоні частот. За допомогою алгоритму, описаного в у попередньому пункті, знаходимо значення амплітуди та визначаємо значення функції нев'язки

$$z_1(A) = A^* - A. \quad (13)$$

Потім здійснюємо “спуск” по амплітуді

$$A_{i+1} = A_i - \Delta A \quad (i = 0, 1, 2, \dots),$$

доки не виконається умова

$$z_1(A_i) \cdot z_1(A_{i+1}) < 0,$$

тобто доки не буде знайдено інтервал $[A_i, A_{i+1}]$, що містить корінь рівняння (13). Тут ΔA – крок по амплітуді (визначається за результатами розрахунків АЧХ моделей розглядуємого класу).

Найбільш швидкодіючим при пошуку кореня зарекомендував себе алгоритм, що сходиться глобально, на базі квазиньютоновського методу з конечно-розносної апроксимацією [3].

Синтез параметрів нелінійної моделі машинного агрегата с дизелем 3ТД. На рис. 1. представлена кінематична схема дизеля 3ТД, з'єднаного зі споживачем (гідрогальмо): 1, 2 – ступиця і маховик демпфера; 3 – впускний колінчастий вал; 4÷8 – шестірні головної передачі; 9 – випускний вал; 10 – пружна муфта з попереднім натягом на випускному валу (рис. 2); 11 – ресора приводу нагнітача; 12 – пружна муфта в приводі нагнітача; 13 – фрикційні муфти; 14 – ротор нагнітача; 15 – ресора приводу турбіни; 16 – ротор турбіни; 17 – маховик двигуна; 18 – резино-пальцева муфта; 19 – гідрогальмо.

На рис. 3 зображені залежності амплітуд пружних моментів нелінійної муфти, ресор нагнітача та турбіни від частоти після оптимізації параметрів моделі. Максимальна амплітуда пружного моменту в муфті дорівнює 4992 Нм і досягається при 318 рад/с (1012 об/хв), відповідно в ресорах нагнітача та турбіни маємо 2331 Нм та 1369 Нм при 278 рад/с (885 об/хв). До оптимізації максимальний пружний момент у головній передачі двигуна досягав майже 11 кНм. На рис. 4 представлені фрагменти осцилограми з записами пружного моменту в нелінійній муфті і кутової швидкості маховика для різних обертів двигуна при їх зростанні.

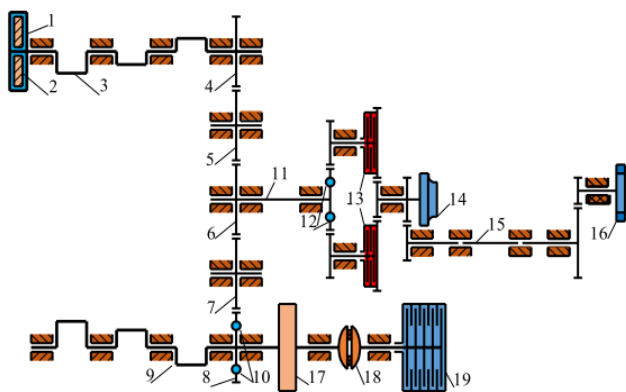


Рис. 1. Кінематична схема двигуна ЗТД із споживачем

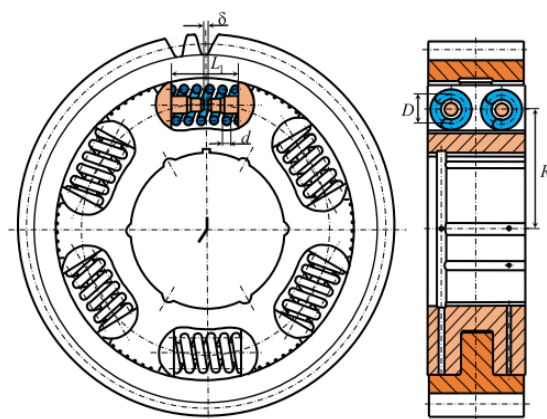


Рис. 2. Нелінійна пружна муфта

Висновки. 1. Запропоновано метод параметричного синтезу нелінійних моделей машинних агрегатів із ДВЗ за наявності багатозначної цільової функції. 2. Розроблено ефективний алгоритм розв’язання задач аналізу, що використовує гармонічну лінеаризацію для інтегральних рівнянь руху, записаних за допомогою ІЧХ; число рівнянь дорівнює числу нелінійностей і трудомісткість розв’язання задачі практично не залежить від числа степенів вільності моделі, що має принципове значення для розв’язання задач синтезу та оптимізації. 3. Викладено алгоритм визначення максимальних за частотою пружних моментів, що відповідають верхнім гілкам стійких розв’язків в області багатозначності АЧХ. 4. Побудовано достовірну нелінійну динамічну модель машинного агрегату з дизелем ЗТД. 5. Здійснено оптимальний синтез її параметрів з метою зниження динамічних навантажень. 6. Наведено результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з даними розрахунків.

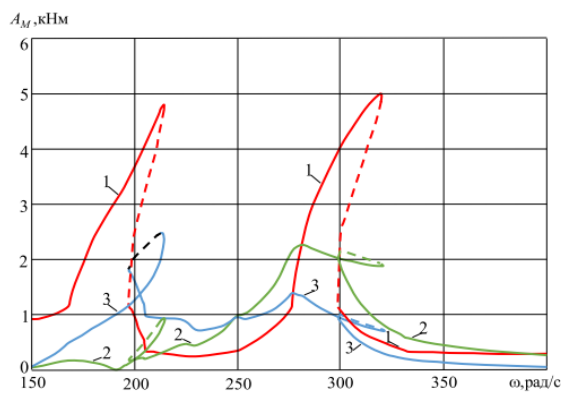


Рис. 3. Амплітуди моментів: 1 – нелінійна муфта; 2 – ресора нагнітача; 3 – ресора турбіни

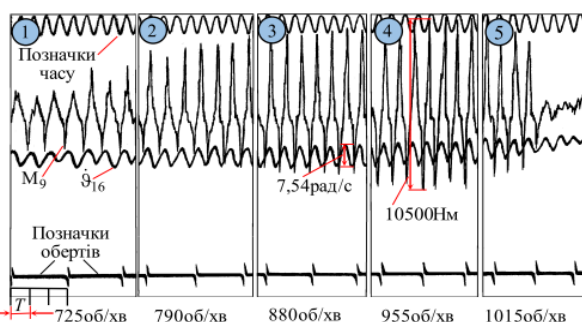


Рис. 4. Осцилограми пружного моменту в нелінійній муфті та кутової швидкості маховика

Список використаних джерел

1. Byrtus M. On modeling and vibration of gear drives influenced by nonlinear couplings / M. Byrtus, V. Zeman // Mechanism and Machine Theory.– 2023.– vol. 46.– № 3.– P. 375-397.
2. Шатохин В.М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: Монография / В.М. Шатохин.– Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008.– 456 с.
3. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелінійне програмування. Методи послідовної безумовної мінімізації.– М.: Мир, 1992.– 240 с.
4. Немировский А.С., Юдин Д.Б. Складність задач та ефективність методів оптимізації.– М.: Наука, 1999.– 284 с.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВОМУ ЛАНЦЮЗІ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ ГУСЕНИЧНОЇ МАШИНИ З ГІДРООБ'ЄМНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вступ. Криволінійний рух машини є найскладнішим режимом її роботи. У цьому режимі гусенична машина (ГМ) експлуатується значну частину часу, а її силові агрегати – двигун, трансмісія, ходова частина – мають екстремальні навантаження. Для швидкохідних машин поворот може супроводжуватися занесенням або юзом, що серйозно погіршує її стійкість і керованість. Досвід доведення та експлуатації машинних агрегатів з ДВЗ, силові ланцюги яких включають гідрооб'ємні передачі (ГОП), показує, що небезпечні динамічні процеси в їх механічній частині та гідрооб'ємних машинах (ГОМ) на характерних сталих і перехідних режимах можуть приводити до надмірної зношеності поверхонь опор, башмаків, відривів башмаків від опорних поверхонь, що практично веде до передчасного виходу з ладу ГОП. При виконанні поворотів на підвищених передачах відбувається спрацювання перепускних клапанів (тиски досягають граничних значень), що супроводжується значним ростом радіусів повороту, а отже й істотним уповільненням процесів повороту. Математичні моделі динамічних процесів у силових передачах з ГОП, які описували б взаємодії багатомірної (в загальному випадку нелінійної) механічної крутильної системи з гідроприводом, враховували керуючі впливи, параметри об'єкта, що рухається, і характеристики дороги практично відсутні, або мають вкрай обмежені можливості.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. У більшості сучасних робіт динамічні розрахунки здійснюються окремо для трансмісії і процесів повороту; при наявності в силовому ланцюзі ГОП не враховується вплив пружності з'єднуючих валів і сервопривіда на розвиток динамічних процесів. У статтях [1, 2] розроблені моделі для проектування і оцінки ефективності ГМ з гідромеханічною трансмісією, що включає гідромашини, систему керування похилою шайбою і планетарною передачею; запропоновано динамічну модель ГМ, що враховує силу тяги, опір руху і відбір потужності. Аналізу особливостей передачі потужності гідромеханічною трансмісією ГМ присвячені роботи [3, 4].

При використанні ГОП в якості пристрою, що забезпечує поворот об'єкта, необхідно брати до уваги, що гранична величина кутової швидкості повороту найчастіше обмежується не стільки потужністю двигуна, скільки потужністю, що віддається ГОП. Поворот на підвищених передачах призводить до підвищення тиску рідини і спрацюванню перепускних клапанів. У цьому випадку привод не забезпечує необхідний радіус повороту об'єкта. Відсутність відповідних математичних моделей повороту утруднює проведення досліджень по вибору необхідних параметрів привода і гідромашин.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є створення універсальної моделі динамічних процесів в силовому ланцюгу ГМ при повороті, що включає двовальний двигун, трансмісію з диференціальними механізмами і ГОП, ходову частину. Для досягнення поставленої мети повинні бути розв'язані наступні задачі: виконати розрахунки динамічних процесів на усіх режимах руху ГМ без сервопривіда при різних законах зміни кута повороту шайби і при врахуванні сервопривіда; дослідити вплив зміни кута нахилу шайби насоса на кутові швидкості валу двигуна та гідромотора; встановити вплив передаточного відношення між бортами на закидання тиску і час повороту ГМ; дослідити можливості використання сервопривіда, елементів диференціальних механізмів, характерних обсягів гідромашин для зниження динамічних навантажень і забезпечення необхідних параметрів повороту машини;

провести розрахунково-експериментальні дослідження динамічних процесів при повороті транспортного засобу.

Математична модель динамічних процесів у силовому ланцюгу механізму повороту ГМ з ГОП. В роботі [4] побудовано універсальні математичні моделі процесів повороту ГМ з дизелем 6ТД-2, які включають: сам двигун, трансмісію з диференціальними редукторами і ГОП, ходову частину. Моделі дозволяють врахувати податливість з'єднувальних валів, керування шайбою насоса безпосередньо і через сервопривід, властивості ГМ і характеристики шляху. Кінематична схема силової передачі приведена на рис. 1 без низькочастотного контуру привода до турбіни і компресора. Її відмінною рисою є наявність ГОП МП і двох диференціальних редукторів. На схемі показаний випускний вал двигуна, диференціальні механізми, регульована і нерегульована гідромашини, споживачі потужності, шестірні і пружні безінерційні елементи з коефіцієнтами жорсткості c_1, c_2, c_3, c_4 .

Система диференціальних рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} I_{1,1}\ddot{\vartheta}_{\text{кв}} + I_{1,9}\ddot{\vartheta}_{z_3^*} + I_{1,11}\ddot{\vartheta}_{z_3} &= Q_{\vartheta_{\text{кв}}} - M_1; & I_{11,1}\ddot{\vartheta}_{\text{кв}} + I_{11,11}\ddot{\vartheta}_{z_3} &= Q_{\vartheta_{z_3}} - M_{11}; \\ I_{3,3}\ddot{\vartheta}_{\text{н}} &= Q_{\vartheta_{\text{н}}} - M_3; & k_{\text{упр}} \frac{d(\Delta p)}{dt} + k_{\text{п}}\Delta p + q_{\text{н}}e_{\text{н}}\dot{\vartheta}_{\text{н}} + q_{\text{м}}e_{\text{м}}\dot{\vartheta}_{\text{м}} &= 0; \\ I_{5,5}\ddot{\vartheta}_{\text{м}} &= Q_{\vartheta_{\text{м}}} - M_5; & \dot{\vartheta}_{\text{п}} &= \alpha_2 R_{\text{в.к.}} \frac{\dot{\vartheta}_{z_3} - \dot{\vartheta}_{z_3^*}}{i_k B}; \\ I_{7,7}\ddot{\vartheta}_{z_8} &= Q_{\vartheta_{z_8}} - M_7; & \dot{\gamma}_{\text{н}} &= \frac{u(t) - \gamma_{\text{н}}}{T_a}, \\ I_{9,1}\ddot{\vartheta}_{\text{кв}} + I_{9,9}\ddot{\vartheta}_{z_3^*} &= Q_{\vartheta_{z_3^*}} - M_9; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $I_{i,j}$ – ненульові елементи матриці інерції; M_i – моменти сил пружності в з'єднувальних валах; $Q_{\vartheta_{\text{кв}}}, Q_{\vartheta_{\text{н}}}, Q_{\vartheta_{\text{м}}}, Q_{\vartheta_{z_8}}, Q_{\vartheta_{z_3^*}}, Q_{\vartheta_{z_3}}$ – узагальнені сили; Δp – різниця тисків у магістралях ГОП; $k_{\text{упр}}, k_{\text{п}}, q_{\text{н}}, q_{\text{м}}, e_{\text{н}}, e_{\text{м}}$ – параметри, що характеризують насос і мотор; $\vartheta_{\text{п}}$ – кут повороту об'єкта; $\alpha_2, R_{\text{в.к.}}, B, i_k$ – відповідно параметр трансмісії, радіус ведучих коліс, ширина колії, передаточне відношення передачі; $u(t), T_a$ – відповідно, керуючий сигнал і постійна часу сервомотора.

У побудованій математичній моделі передбачається, що двигун працює тільки на зовнішній характеристиці, а коефіцієнт опору ґрунту $f_{\text{тр}}$ не залежить від швидкості руху машини. Однак, як показали розрахунки, основні динамічні властивості досліджуваного об'єкта побудована математична модель відображає правильно.

Розрахунково-експериментальні дослідження повороту. Так як кутова швидкість двигуна для даної передачі на стійкому режимі може змінюватися у вузькому діапазоні (рис. 2), то величиною, що визначає радіус повороту в даний момент, є кутова швидкість гідромотора.

Початковими даними при дослідженні перехідних режимів повороту є параметри прямолінійного руху машини, які передували повороту. При цьому для однозначного вибору стійкого і реалізуемого режиму руху дуже зручним виявилось сімейство зовнішніх характеристик (їх число дорівнює кількості передач бортових коробок), перетворених у функцію швидкості прямолінійного руху (див. рис. 2). Таку перебудову вдається здійснити, оскільки між кутовою швидкістю колінчастого валу двигуна і швидкістю прямолінійного руху ГМ існує кінематичний зв'язок [4]. Як видно із рис. 2, припущення, що двигун працює на зовнішній характеристиці, призводить до того, що існують цілі зони швидкостей, при яких рух ГМ або неможливий, або нестійкий. Наприклад, при русі зі швидкістю $v=1,39\text{м/с}$ потрапимо на нестійку гілку зовнішньої характеристики на першій передачі (точка А), а зі швидкістю $v=0,694\text{м/с}$ рухатися в рамках прийнятої моделі неможливо.

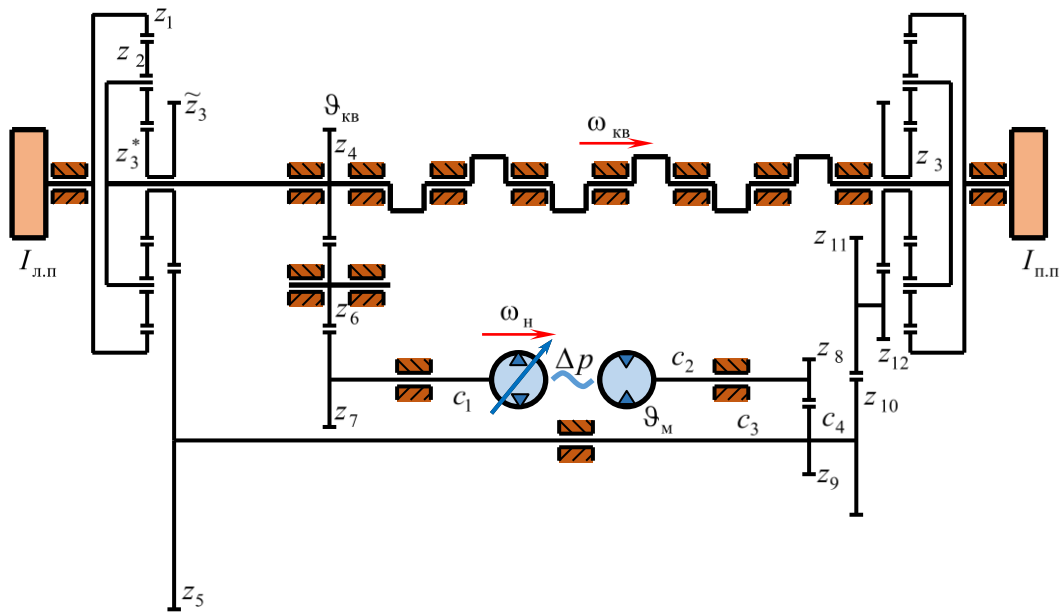


Рис. 1. Кінематична схема силового ланцюга з гідروоб'ємною передачею механізму повороту

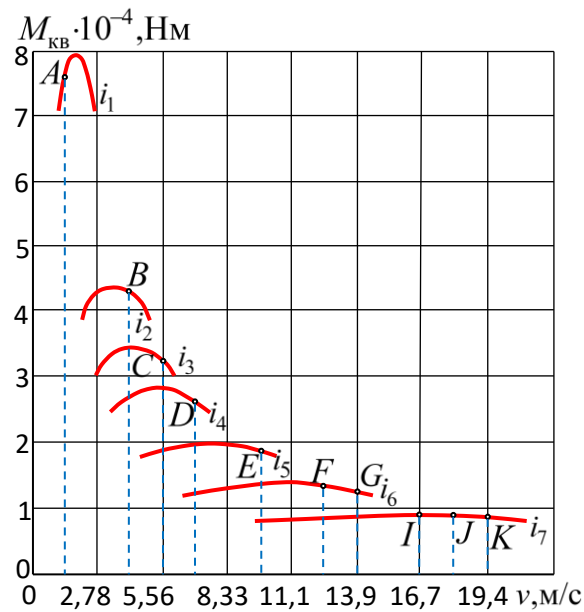


Рис. 2. Сімейство зовнішніх характеристик на різних передачах

Проте існують великі зони швидкостей, у яких рух фізично реалізується, тобто при цих швидкостях руху двигун працює на стійкій гілці зовнішньої характеристики. Саме ці зони великих швидкостей і мають найбільший інтерес з точки зору великої динамічної навантаженості силової установки та трансмісії. Ці режими і були обрані як розрахункові при моделюванні перехідних режимів, що виникають при повороті машини.

Для всебічного дослідження динамічних процесів було обрано дев'ять режимів руху об'єкта на наступній множині швидкостей (м/с) {4,17; 5,56; 6,94; 9,72; 13,9; 16,7; 18,1; 19,4}. Як видно з рис. 2, цим швидкостям відповідають стійкі режими роботи двигуна різних передачах (точки B, C, ..., K). Потім з умови рівності моменту двигуна, приведеного до провідної зірочки, і моменту опору гусениць на них визначалося значення коефіцієнта опору ґрунту $f_{тр}$. Цьому коефіцієнту ставилася у відповідність дорога з табл. 1 з відповідним

незначним коригуванням самого коефіцієнта $f_{тр}$. Вважаючи тепер тип дороги, якою рухається ГМ, заданим, зворотним перерахунком уточнюємо режим роботи двигуна і швидкість прямолінійного руху об'єкта заданою дорогою. Якщо двигун, як і раніше, працює на стійкому режимі, то цей варіант приймаємо для розрахункового дослідження. У табл. 2 наведено початкові значення параметрів чотирьох розрахункових варіантів. Вибрані варіанти охоплюють широкий спектр швидкостей руху, і фізичний стан траси.

Таблиця 1 – Коефіцієнт опору прямолінійному руху

	Тип ґрунту					
	Дорога з твердим покриттям	Суша ґрунтова дорога	Брудна ґрунтова дорога	Піщана дорога	Луг	Сніг
$f_{тр}$	0,03–0,05	0,06–0,07	0,10–0,13	0,15–0,20	0,08–0,10	0,10–0,40

Таблиця 2 – Початкові значення параметрів

№ варіанта	Тип дороги	$v, \text{м/с}$	$f_{тр}$	$\mu_{\max}$	$\omega_{\text{кв}}, \text{с}^{-1}$	Передача
1	сніг	4,83	0,305	0,3	284	$i_2=24$
2	пісок	6,97	0,206	0,3	260	$i_4=15$
3	брудна ґрунтова	13,8	0,106	0,35	270	$i_6=8$
4	суха ґрунтова	17,9	0,076	0,8	243	$i_7=5,45$

Проведені розрахунково-експериментальні дослідження з вибору постійної часу сервопривода і передатного відношення між бортами (i_6) дозволили виключити закиди тиску ($p_{\max} = 50 \text{ МПа}$) і значно скоротити час повороту ГМ на підвищених передачах. Типова осцилограма повороту наведена на рис. 3. Встановлено, що при зменшеному значенні $i_6=1,22$ (вихідне значення $i_6=1,32$) спрацьовування перепускного клапана практично не відбувається.

Записано криві, що характеризують положення органу керування γ_n , тиск у нагнітаючій магістралі p , тиск підживлення p_n , частоти обертання сонячних шестерень n_c , колінчастого валу $n_{\text{кв.}}$, лівого $n_{\text{л.з.}}$ і правого $n_{\text{п.з.}}$ епіциклів. Після зіставлення результатів розрахунків з експериментом для уточнення моделей, проведені дослідження з вибору раціональних значень параметрів, що забезпечують прийнятні характеристики повороту та динамічних процесів.

У дослідженнях перехідних процесів у моделі двигуна і трансмісії було виконано дві серії розрахунків: спочатку вивчався розвиток динамічних процесів на різних режимах руху об'єкта без сервопривода при різних законах зміни кута повороту шайби, потім оцінювався вплив сервопривода на динамічні процеси, що відбуваються у моделі. Варіювалися тип шляху, швидкість прямолінійного руху перед входом у поворот, коефіцієнти опору прямолінійному руху і бічному зрушенню [4], номер передачі і частота обертання валу двигуна.

Введення сервопривода, як показали дослідження [4], значно поліпшує динаміку ГОП МП. Зокрема дозволяє ліквідувати або значно зменшити закиди тиску у гідросистемі. Кут відхилення шайби формується керуючим впливом $u(t)$ на сервопривід відповідно до рівнянь (1). Він залежить не тільки від впливу водія $u(t)$, але і від постійної сервопривода T_a . Існують оптимальні значення постійної часу сервопривода [4], компромісно задовольняючи і умовам експлуатації, і динамічному навантаженню ГОП МП.

Прийняті моделі дозволяють також оцінювати вплив різних компоновань механічної частини привода (диференціальних механізмів і числа зубців шестерень), характерних обсягів гідромашин на параметри повороту та динамічні навантаження.

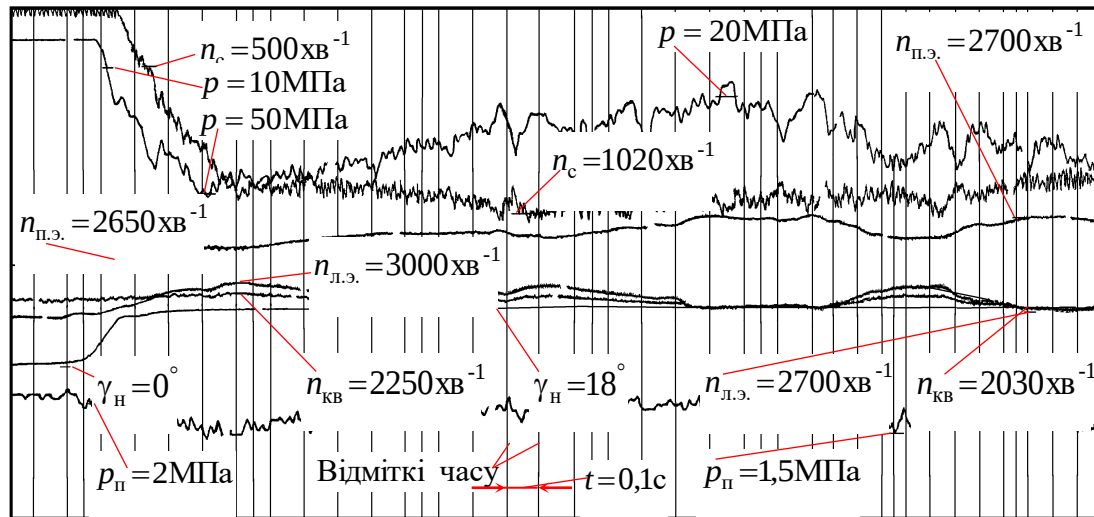


Рис. 3. Поворот вправо на четвертій передачі ($i_6=1,22$)

Висновки. 1. Запропоновано універсальну модель динамічних процесів у силовому ланцюгу гусеничної машини при повороті, що включає двовальний двигун, трансмісію з диференціальними механізмами і ГОП, ходову частину. 2. Прийнято, що двигун працює на зовнішній характеристиці, коефіцієнт опору ґрунту не залежить від швидкості руху машини. 3. Сімейство зовнішніх характеристик, перетворено у функцію швидкості прямолінійного руху. 4. Виконано дві серії розрахунків динамічних процесів на усіх режимах руху ГМ: без сервопривіда при різних законах зміни кута повороту шайби; при врахуванні сервопривіда. 5. Досліджено вплив зміни кута нахилу шайби насоса на кутові швидкості валу двигуна та гідромотора. 6. Досліджено вплив зміни кута нахилу шайби насоса на тиск у гідросистемі та кути повороту машини. 7. Досліджено ефект поєднання максимальної кутової швидкості повороту машини і тягового моменту гідромотора ГОП, що забезпечує поворот машини з мінімальним радіусом на будь-якій з передач. 8. Установлено, що на підвищених передачах при передаточному відношенні між бортами $i_6=1,32$ через спрацювання перепускних клапанів процес повороту може суттєво затягуватися; зменшення i_6 до 1,22 дозволяє практично виключити закидання тиску і значно скоротити час повороту. 9. Досліджено можливості використання сервопривіда, елементів диференціальних механізмів, характерних обсягів гідромашин для зниження динамічних навантажень і забезпечення необхідних параметрів повороту об'єкта. 10. Викладений підхід перспективний при розробці та удосконалюванні цілого класу аналогічних конструкцій.

Список використаних джерел

1. Choi S.H. Modeling and simulation for a tractor equipped with hydro-mechanical transmission / S.H. Choi, H.J. Kim, S.H. Ahn et al. // Journal of Biosystems Engineering.– 2013.– vol. 38.– № 3.– P. 171-179.
2. Bottiglione F. Infinitely variable transmissions in neutral gear: torque ratio and power recirculation / F. Bottiglione, S. De Pinto, G. Mantriota // Mechanism and Machine Theory.– 2014.– № 74.– P. 285-298.
3. Park Y.J. Analysis and verification of power transmission characteristics of the hydromechanical transmission for agricultural tractors / Y.J. Park, S.C. Kim, J.G. Kim // Journal of Mechanical Science and Technology– 2016.– vol. 30.– P. 5063-5072.
4. Шатохин В.М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: Монография / В.М. Шатохин.– Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008.– 456 с.

**ДВОРІВНЕВА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗМІЩЕННЯ
ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНІЗМУ ТИПУ 3К**

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Особливістю планетарних механізмів типу 3К є те, що те саме значення його передаточного відношення може бути реалізовано при різних значеннях чисел зубців його зубчастих коліс. У таких випадках вибір чисел зубців здійснюється з урахуванням вимог, що пред'являються до їх міцності та витривалості. Але не цих вимог достатньо для правильного вибору чисел зубців. Іноді доводиться враховувати обмеження значення якісних характеристик зачеплень проєктованого планетарного механізму типу 3К. Проєктування таких механізмів є складним та трудомістким завданням. Тому створення комп'ютерних методик оптимального проєктування конструкцій планетарних механізмів типу 3К, що дозволяють проаналізувати багато варіантів їх конструкцій з урахуванням різних обмежень та мінімізувати час їхньої конструкторської підготовки є актуальним завданням.

На рис.1 наведені кінематичні схеми планетарного механізму типу 3К з двовінцевим (рис. 1, а) і одновінцевим сателітами (рис. 1, б) відповідно. Зазначимо, що є інші варіанти кінематичної схеми планетарного механізму типу 3К.

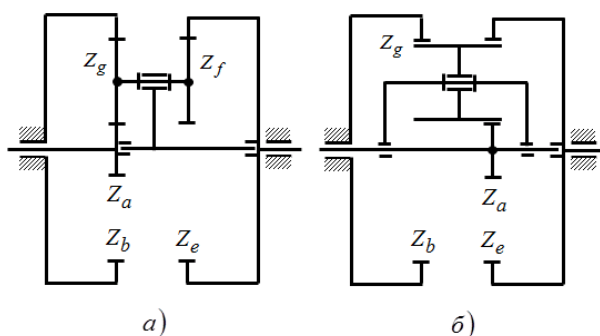


Рис. 1. Схема планетарного механізму типу 3К

Передаточне відношення механізму показаного на рис.1 а, визначають за формулою

$$U_{ae}^b = \frac{1 + \frac{Z_b}{Z_a}}{1 - \frac{Z_b}{Z_g} \frac{Z_f}{Z_e}}. \quad (1)$$

Прийнявши умови для чисел зубів $Z_b > Z_e$ і $Z_g > Z_f$, отримаємо $U_{ae}^b > 0$.

Для механізму з одновінцевим сателітом, показаним на рис.1 б, передаточне відношення визначають за формулою (1) з урахуванням рівності $Z_g = Z_f$. Забезпечивши умову $Z_e > Z_b$, отримаємо $U_{ae}^b > 0$. Для планетарного механізму типу 3К з прямозубими циліндричними колесами умова співвісності має вигляд

$$\frac{m_a(Z_a + Z_g)}{\cos(\alpha_{twa})} = \frac{m_b(Z_b - Z_g)}{\cos(\alpha_{twb})} = \frac{m_e(Z_e - Z_f)}{\cos(\alpha_{twe})}, \quad (2)$$

де m_a , m_b , m_e – модулі в зачепленнях центральних зубчастих коліс Z_a , Z_b і Z_e відповідно, але $m_a = m_b$; α_{twa} , α_{twb} , α_{twe} – кути зачеплення центральних зубчастих коліс Z_a , Z_b і Z_e відповідно.

Умова (2) записана з урахуванням рівності ділильного кута α_t профілю в торцевому перерізі зубчастих коліс планетарного механізму, тобто маємо рівність $\alpha_{ta} = \alpha_{tb} = \alpha_{te}$.

У загальному випадку умову співвідності зубчастих зачеплень 3К планетарного механізму мають вид

$$a_{wa} = a_{wb} = a_{we}, \quad (3)$$

де $a_{wa} = m_a \frac{Z_a + Z_g}{2} \frac{\cos(\alpha_{ta})}{\cos(\alpha_{twa})}$ – міжосьова відстань a_w зубчастого зачеплення $Z_a - Z_g$;

$a_{wb} = m_b \frac{Z_b - Z_g}{2} \frac{\cos(\alpha_{tb})}{\cos(\alpha_{twb})}$ – міжосьова відстань a_w зубчастого зачеплення $Z_g - Z_b$;

$a_{we} = m_e \frac{Z_e - Z_f}{2} \frac{\cos(\alpha_{te})}{\cos(\alpha_{twe})}$ – міжосьова відстань a_w зубчастого зачеплення $Z_f - Z_e$.

Умова сусідства механізмів, наведених на рис.1, записують у вигляді двох нерівностей:

$$\left. \begin{aligned} m_a (Z_a + Z_g) \sin\left(\frac{\pi}{k}\right) &\geq Z_g + 2, \quad x\lambda \leq 1 \\ m_e (Z_e - Z_f) \sin\left(\frac{\pi}{k}\right) &\geq Z_f + 2, \quad x\lambda \leq 1 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де $x\lambda = \frac{(d)_g}{(d)_f} = \left(\frac{z_g}{z_f}\right) \cdot \left(\frac{m_a}{m_e}\right) = x \cdot \lambda$, $x = \frac{z_g}{z_f}$, $\lambda = \frac{m_a}{m_e}$; k – кількість сателітів.

Умова складання механізмів, що розглядаються, має вигляд

$$\frac{Z_a + Z_b}{k} = N, \quad \frac{Z_b}{k} \left(1 - \frac{Z_g}{Z_f} \cdot \frac{Z_e}{Z_b}\right) + \frac{Z_g}{Z_f} Q = P, \quad (5)$$

де N, P, Q – цілі додатні числа.

Нехай числа зубців, модулі та профільні кути α_t зубчастих коліс планетарного механізму відомі. При цьому числа зубців та модулі зачеплень задовольняють умовам 1, 4 та 5. Необхідно підібрати значення коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс, за яких виконується умова співвідності виду (3).

У роботі [1] наведена методика оптимального проектування планетарних механізмів типу 3К з урахуванням вимог до якісних характеристик його зубчастих зачеплень. У даній методиці для оптимального вибору значень коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс запропоновано замість блокуючих контурів для зубчастих зачеплень застосовувати чисельну оптимізацію з графічним відображенням цільових функцій. Як критерії оптимізації прийняті обмеження, що накладаються на коефіцієнти торцевого перекриття, питомого тиску і ковзання, значення яких є функціями коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс. Алгоритм розглянутої методики продемонстровано на прикладі вибору значень коефіцієнтів зміщення дрібномодульного планетарного механізму тип 3К. Параметри цих коліс такі: $Z_a=17$; $Z_g=29$; $Z_b=73$; $Z_f=29$; $Z_e=76$; $m_a=m_b=m_e=0,4$ мм; $\alpha_{ta}=\alpha_{tb}=\alpha_{te}=20^\circ$. Передаточне відношення механізму $U_{ae}^b=134,1176$.

Для кожного зубчастого зачеплення планетарного механізму 3К розглянемо функцію залежності міжосьової відстані a_w залежно від кута зачеплення α_{tw} :

$$a_{wa} = a_{wa}(\alpha_{twa}), \quad a_{wb} = a_{wb}(\alpha_{twb}), \quad a_{we} = a_{we}(\alpha_{twe}). \quad (6)$$

На рис. 2 показані графіки функцій $a_w = a_w(\alpha_{tw})$ для зубчастих зачеплень планетарного механізму типу 3К. Графіки були побудовані для діапазону зміни кутів зачеплення від 10° до 40° . Рішення рівняння (3) графічним методом показане на рис. 3. Точки перетину графіків $a_w = a_w(\alpha_{tw})$ та лінії заданої міжосьової відстані $a_w(\alpha_{tw}) = a_w^*$ на рис. 3 показані кружками

відповідного кольору. Отримано такі значення кутів зачеплень зубчастих коліс: $\alpha_{twa}^* = 23,1762^\circ$; $\alpha_{twb}^* = 28,4384^\circ$; $\alpha_{twe}^* = 20,0684^\circ$.

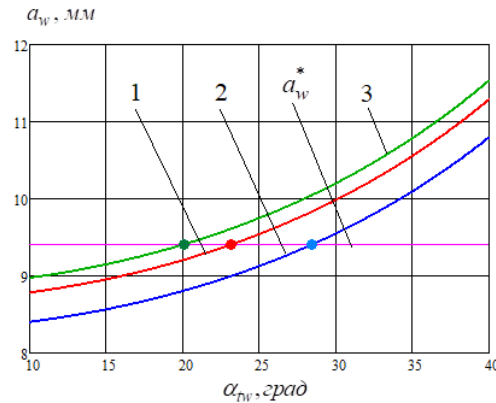


Рис. 2. Графіки функцій $a_w = a_w(\alpha_{tw})$ зубчастих зачеплень планетарного механізму типу 3К і лінія заданої міжосьової відстані a_w^* :

1 – зачеплення Z_a - Z_g ; 2 – зачеплення Z_g - Z_b ; 3 – зачеплення Z_f - Z_e .

Точки перетину графіків $a_w = a_w(\alpha_{tw})$ та лінії заданої міжосьової відстані $a_w(\alpha_{tw}) = a_w^*$ на рис. 3 показані кружками відповідного кольору. Отримано такі значення кутів зачеплень зубчастих коліс: $\alpha_{twa}^* = 23,1762^\circ$; $\alpha_{twb}^* = 28,4384^\circ$; $\alpha_{twe}^* = 20,0684^\circ$.

Знаходимо коефіцієнт суми зміщень для зовнішнього зубчастого зачеплення Z_a - Z_g :

$$x_{\Sigma ag} = \frac{(\text{inv}(\alpha_{twa}^*) - \text{inv}(\alpha_{ta})) (Z_a + Z_g)}{2 \text{tg} \alpha_{ta}} = 0,55. \quad (7)$$

Знаходимо коефіцієнти різниці зміщень для внутрішніх зубчастих зачеплень Z_g - Z_b та Z_f - Z_e :

$$x_{Dbg} = \frac{(\text{inv}(\alpha_{twb}^*) - \text{inv}(\alpha_{tb})) (Z_b - Z_g)}{2 \text{tg} \alpha_{tb}} = 1,8325, \quad (8)$$

$$x_{Def} = \frac{(\text{inv}(\alpha_{twe}^*) - \text{inv}(\alpha_{te})) (Z_e - Z_f)}{2 \text{tg} \alpha_{te}} = 0,0103. \quad (9)$$

Значення коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс повинні задовольняти наступним рівнянням:

$$x_a + x_g = x_{\Sigma ag}, \quad (10)$$

$$x_b - x_g = x_{Dbg}, \quad (11)$$

$$x_e - x_f = x_{Def}. \quad (12)$$

Рівняння (10)–(12) утворюють систему 3 лінійних алгебраїчних рівнянь щодо 5 значень коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс для випадку двовінцевих сателітів. У разі одновінцевих сателітів число невідомих коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс дорівнюватиме 4.

Таким чином, для розв'язування системи рівнянь (10)–(12) необхідно задати одне значення коефіцієнта зміщення у разі одновінцевих сателітів або два значення коефіцієнтів зміщення у разі двовінцевих сателітів. При цьому в якості значень, що задаються, можна вибирати будь-які коефіцієнти зміщення. Можливий інший підхід для визначення значень коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс, ґрунтований на рішенні трьох оптимізаційних задач [1]. При постановці цих задач рівняння (10)–(12) розглядатимуться як обмеження для пошуку оптимальних рішень. До цих обмежень потрібно буде додати ще обмеження на діапазони варіювання шуканих змінних.

Отже, рівняння (1)–(9) являють собою математичну модель першого рівня оптимізації вибору коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс планетарного механізму типу 3К. Результатом цієї оптимізації є: кінематична схема механізму; числа зубців зубчастих коліс; модулі зубчастих зачеплень механізму; ділильні кути α_t ; міжосьові відстані a_w зачеплень механізму; кути зачеплення α_{tw} зачеплень механізму; коефіцієнт суми зміщень для зовнішнього зубчастого зачеплення $X_{\Sigma ag}$; коефіцієнти різниці зміщень для внутрішніх зубчастих зачеплень X_{Dbg} та X_{Def} .

Рівняння (10)–(12), цільові функції оптимізації заданих критеріїв і обмеження як на значення допустимих значень цільових функцій, так і на можливі значення коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс відносяться до другого рівня оптимізації, що розглядається. У роботі [1] наведено алгоритми побудови цільових функцій оптимізації, розглянуто особливості їх диференціальних властивостей та можливі методи розв'язання задач оптимізації. Також наведено числові приклади реалізації алгоритмів оптимізації. Методика оптимального проектування планетарних механізмів типу 3К з урахуванням вимог, що накладаються на коефіцієнти торцевого перекриття його зубчастих зачеплень розглядається у роботі [2]. Розглянемо приклад рішення системи рівнянь (10)–(12) для випадку одновінцевого сателіта [2]. Нехай прийнято рішення, що коефіцієнт зміщення для сателіта $x_g^* = 0,25$. Враховуючи рівність $x_f = x_g = 0,25$, отримаємо наступне рішення системи рівнянь (10)–(12): $x_a = 0,3$; $x_b = 2,0825$; $x_e = 0,2603$.

Розв'язання системи рівнянь (10)–(12) графічним методом показане на рис. 4. Точки перетину графіків $x_a = x_a(x_g)$, $x_b = x_b(x_g)$, $x_e = x_e(x_g)$ та лінії заданого значення коефіцієнта зміщення x_g^* на рис. 3 показані квадратиком чорного кольору. Оскільки значення знайдених коефіцієнтів зміщення x_a і x_e є близькими ($x_a \approx x_e$), то на рис. 4 вони відзначені одним квадратиком.

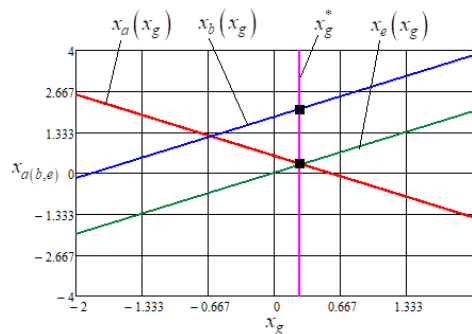


Рис. 3. Графічне розв'язання системи рівнянь (10)–(12)

Коефіцієнти торцевого перекриття зубчастих зачеплень визначаються по формулі

$$(\varepsilon_\alpha)_{pq} = \frac{z_p \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{ap}) \pm z_q \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{aq})}{2\pi} \mp \frac{(z_p \pm z_q) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{twpq})}{2\pi}, \quad (13)$$

де $p = a, g, f$, $q = g, b, e$ – індекси зубчастих коліс планетарного механізму типу 3К, схема якого наведена на рис. 1, причому індекс p вказує на шестерню, а індекс q – на колесо відповідно зубчастого зачеплення $Z_p - Z_q$; α_{api} , α_{aqi} – кути профілю зубця на колі вершин зубчастого колеса Z_p і Z_q відповідно; α_{twpq} – кут зачеплення зубчастих коліс Z_p і Z_q відповідно. У формулі (13) – верхні знаки відповідають зовнішньому, а нижні – внутрішньому зубчастому зачепленню. Отримані наступні результати розрахунків, виконаних по формулі (13): $(\varepsilon_\alpha)_{ag} = 1,415$; $(\varepsilon_\alpha)_{gb} = 1,547$; $(\varepsilon_\alpha)_{fe} = 1,564$.

Введемо до розгляду для кожного зубчастого зачеплення функції залежності значення коефіцієнта торцевого перекриття зачеплення від значень коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс, що утворюють зачеплення, тобто цільові функції оптимізації. При цьому варійовані значення коефіцієнтів зміщення задовольняють двом умовам: кожен коефіцієнт зміщення

задається в заданому діапазоні значень; сума (для зовнішнього зачеплення) або різниця (для внутрішнього зачеплення) дорівнює заданому значенню.

Введемо наступну функцію однієї незалежної змінної: $f_{ag_x2}(x_1) = x_{\Sigma ag} - x_1$, де x_1 – коефіцієнт зміщення зовнішнього зубчастого зачеплення $Z_a - Z_g$, що задається.

На рис. 4 показаний графік функції (13), що відображає характер залежності коефіцієнта торцевого перекриття зубчастого зачеплення $Z_a - Z_g$ від значень коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс x_a і x_g відповідно.

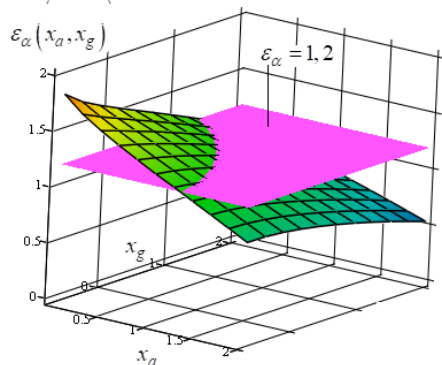


Рис. 4. Графік функції $\varepsilon_\alpha(x_a, x_g)$

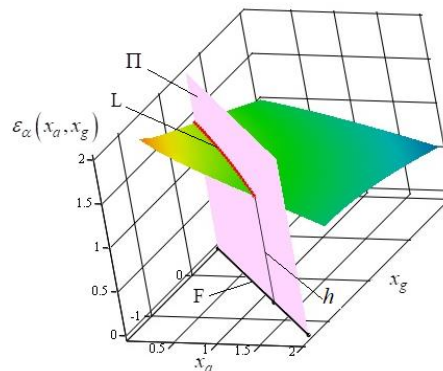


Рис.5. Графіки функцій $\varepsilon_\alpha(x_a, x_g)$, $\varepsilon_{\alpha_ag}(x)$ і $f_{ag_x2}(x_1)$

Графік функції $\varepsilon_{\alpha_ag}(x_a, x_g)$ був побудований для прямокутної області можливих значень коефіцієнтів x_a та x_g . Прямокутна область, де $x_a \in [x_{a\min}, x_{a\max}]$ і $x_g \in [x_{g\min}, x_{g\max}]$, задавалася наступними параметрами: $x_{a\min} = 0,006$; $x_{a\max} = 2$; $x_{g\min} = -0,696$; $x_{g\max} = 2$. Значення $x_{a\min}$ і $x_{g\min}$ визначалися з умови відсутності підрізання зубців. Значення параметрів $x_{a\max}$ і $x_{g\max}$ були набуті такими, як при побудові графічного розв'язку системи рівнянь (10)-(12).

На рис. 5 площина Π , яка перпендикулярна координатній площині x_a, x_g , проходить через відрізок прямої лінії F графіку функції $f_{ag_x2}(x_1)$. Лінія перетину L площини Π з поверхнею функції $\varepsilon_{\alpha_ag}(x_a, x_g)$ утворює графік функції $\varepsilon_{\alpha_ag}(x)$. Відрізок прямої лінії F , показаний на рис. 7, задавався на координатній площині x_a, x_g двома точками. Координати цих точок (x_a, x_g) дорівнювали: $(0,006, 0,544)$; $(2, 1,45)$. Перпендикуляр до координатної площини h , опущений з правої граничної точки відрізка лінії L , перетне точку відрізка лінії F з координатами $(1,246, -0,696)$ (див. рис. 6, а). У цій точці координатної площини x_a, x_g значення функції $\varepsilon_{\alpha_ag}(x_a, x_g)$ дорівнює 1,2066. Аналіз характеру лінії L (рис. 6) показує, що зміна значення функції торцевого перекриття (15) відбувається в діапазоні $1,2066 \leq \varepsilon_{\alpha_ag}(x) \leq 1,4305$. Аналіз властивостей функціональних залежностей виду (15) дозволяє оптимізувати вибір коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс зачеплення $Z_a - Z_g$, що задовольняють умовам забезпечення заданого кута зачеплення $\alpha_{\text{твa}}^*$ і найбільш прийнятному значення коефіцієнта торцевого перекриття ε_{α_ag} . Далі виконується оптимізація інших зубчастих зачеплень механізму.

Розроблена методика оптимізації вибору коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс планетарного механізму типу 3К показала свою достатню ефективність на практиці проектування.

Список використаних джерел

1. Матусевич В. А., Шарабан Ю. В., Шехов О. В. Оптимальне проектування планетарних механізмів типу ЗК. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми механічного приводу. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. №25 (11247). С. 102–110. – Бібліогр.: 12 назв.
2. Оптимізація конструкцій зубчастих зачеплень планетарного механізму типу ЗК за критерієм торцевого перекриття / В. Ю. Шарабан, О. В. Шехов / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР – Х.: «ХПІ» – 2024. №2(2024). – С.121-132. – Бібліогр.: 12 назв.

2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, АГРЕГАТІВ ТА ІНСТРУМЕНТУ

УДК 621.452.3

Бойко Л.Г., д.т.н., професор
L.Boyko@khai.edu
Даценко В.А., ст. викладач
V.A.Darsenko@khai.edu
Піжанкова Н.В., ст. викладач
N.Pizhankova@khai.edu

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБОВАЛЬНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ПОВІНЦЕВИМ ДВОВИМІРНИМ ОПИСОМ КОМПРЕСОРА В ЙОГО СИСТЕМІ Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Математичне моделювання термогазодинамічних параметрів газотурбінних двигунів (ГТД) має важливе значення і застосовується на різних етапах життєвого циклу, починаючи з вибору та оптимізації параметрів розрахункового режиму, у процесі доведення, модернізації та вдосконалення, а також для аналізу впливу умов експлуатації на характеристики двигуна. У багатьох випадках необхідно мати можливість оцінити вплив вхідної нерівномірності потоку, зміни геометричних параметрів у процесі проєктування, що виникло при їх виробництві або в результаті зношування проточної частини.

Для цього необхідно мати сучасні методи розрахунку, що дозволяють уточнити існуючі підходи до моделювання течії в газотурбінних двигунах. Тому розробка нового досконалішого методу розрахунку є актуальним завданням.

Метою роботи є розробка та обґрунтування застосування методу розрахунку термогазодинамічних параметрів ГТД та його характеристик із використанням двовимірного опису багатоступеневого осьового компресора. Такий підхід дасть змогу підвищити рівень моделювання та, відповідно, точність результатів розрахунку параметрів двигуна та його характеристик.

Для досягнення поставленої мети виконано вдосконалення розробленого раніше методу та запропоновано об'єктно-орієнтований підхід до розрахунку параметрів турбовального ГТД та його експлуатаційних характеристик на режимах роботи, що встановилися. В якості нового елементу методу використано розрахунок двовимірної осесиметричної течії в багатоступеновому компресорі.

В основу методу розрахунку покладено нелінійну математичну модель, що дозволяє описати сталі процеси, що відбуваються в окремих вузлах і в двигуні в цілому. Для побудови математичної моделі обраний модульний принцип, який передбачає створення системи взаємопов'язаних і узгоджених між собою моделей вузлів і їх елементів.

Використовуваний підхід до моделювання двовимірної течії в компресорі дозволяє оцінити значну кількість параметрів, що характеризують його роботу.

За допомогою представленого методу можна оцінити вплив зміни геометричних параметрів по висоті лопатки компресора на характеристики двигуна. Врахувати вплив змінного по режимам відбору повітря або перепуску в різних перетинах по тракту компресора, визначити вплив вхідної радіальної нерівномірності на параметри компресора і двигуна в цілому.

В якості апробації представленого методу виконано розрахунок термогазодинамічних параметрів і дросельної характеристики однокаскадного турбовального газотурбінного двигуна з 12-ти ступеневим осьовим компресором. Зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними показали задовільну збіжність.

ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПУ УНІФІКАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНАСТКИ ПРИ ЕГШ КРУПНИХ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Розробка нових технологічних процесів для виготовлення деталей для сучасних авіаційних ракет та космічних кораблів у умовах прототипного виробництва є актуальним завданням. Вимоги таких галузей відповідають електрогідравлічним методам формоутворення, та відрізняються низькими термінами та витратами на технологічну підготовку виробництва.

Метою роботи є підвищення ефективності електро-гідравлічного штампування (ЕГШ), шляхом доведення у відповідність умови технологічної системи ЕГШ до принципів уніфікації.

У сучасних конструкціях авіаційної та космічної техніки широко використовуються велико габаритні листові деталі. Виробництво таких конструкцій та пристроїв має прототипний та дрібносерійний характер. Тому до техпроцесів та обладнання за для їх штампування виявляються вимоги забезпечення мінімальних термінів та витрат на технологічну підготовку виробництва.

Такі вимоги значною мірою відповідають способи та методи електрогідравлічного штампування та ЕГ-перси з керуванням плей потоків енергії, що застосовуються до заготовки [1]. Під час експлуатації таких процесів використовується лише один елемент з формоутворюючий поверхнею, що, а рідке середовище відіграє роль другого елемента. Саме вона передає потоки енергії у вигляді тиску від джерела виділення енергії у вигляді тиску з джерела виділення енергії до деформуючій поверхні заготовки.

Слід зазначити, що у собівартості виробництва великогабаритних деталей при виготовленні невеликими партіями (кількістю) основною позицією витрат є витрати на виробництво технологічної оснастки. Це пояснюється її великими габаритними розмірами, складною за формою робочої поверхні та високими вимогами до точності та шорсткості.

Основна функція технологічного обладнання для штампування деталей листа полягає у обмеженні деформації заготовки, для надання їй заданої форми та розміру та підтримування цих параметрів протягом терміну експлуатації оснастки. Виходячи з цього постулату, можна відрізнити її основні елементи: форму поверхні деталі та силовий корпус, що надає цю поверхню від деформації. Практична реалізація цієї тези може бути представлена у наступному вигляді (рис. 1, [1]).

У міцному універсальному сталевому будівлі зварної конструкції розташована індивідуальна формовочна оснастка (формблок) 2, яка може бути виконана з дешевого матеріалу, що легко оброблюється. До формблоку прилягає деталь 3, що відокремлена від

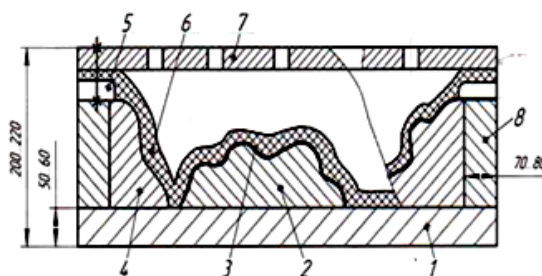


Рис. 1. Варіанта універсального контейнера для розміщення штампової оснастки на столі преса ПЕГ-ХАІ-500:

1 – зварений контейнер; 2 – оправка для формування листової заготовки; 3 – штампована деталь; 4 – кутова вставка; 5 – затискача плита; 6 – гумова діафрагма; 7 – направляюча пластина багатоелектродного розрядного блока; 8 – варіант встановлення витяжної матриці; 9 – гумовий килим

рідкого передаючого середовища еластичною діафрагмою 6. Притиск фланців (за необхідністю) та діафрагми, здійснюються універсальною (за необхідністю – індивідуальною) притискною плитою 5. Високошвидкісні потоки рідини, інакше потоки енергії, впливають на плоску заготовку через отвори у універсальній направляючій плиті 7. За певною відповідністю розмірів деталі, отриманої штампуванням-витяжкою, стінка, яка може бути використовувана для спирання та притискання фланця заготовки.

Щоб виключити пошкодження еластичної діафрагми, кутові зони контейнера заповнені еластичними вкладишами.

Економічна доцільність запропонованої конструкції може бути визначена залежно від параметрів деталей та технологічної оснастки виходячи з загальномашинобудівних норм трудомісткості виробництва поверхонь різних форм та методів їх отримання (рис. 2, [2, 3]). Наведені залежності показують, що механічна обробка плоских прямих поверхонь більш ніж у 4 рази менше, ніж час, ніж обробка фасонних поверхонь. Це визначає використання зварних універсальних контейнерів. Такі контейнери забезпечують невелику трудомісткість при зміні об'єктів виробничих. Переустановлення індивідуальних формоутворюючих поверхонь у універсальному контейнері збільшує гнучкість технологічних процесів штамповки, дозволяє використовувати багатомісну штамповку різних за розмірами деталей.

При виготовленні досить широко використовуваних коробчастих днищ – окантовок отворів проємів, можна в умовах ЕГШ використовувати принцип уніфікації. У конструкціях літальних апаратів, вертольотів та іншої подібної техніки: двері, люки, прорізи окантовуються деталями формою, показаній на рис. 3. Переріз периметра таких деталей може мати кутову, Z-подібну та складніші форми. Габаритні розміри $\sim 1,0 \times 2,0$ м. Генеральна форма деталі – це поверхня подвійної кривизни. Розміри центрального прорізу деталі співмірні з її габаритними розмірами. Найскладнішими важко формоутворюючими та зонами деталі є ділянки сполучення донних і бічних поверхонь з малими радіусами кривизни, а також ділянками сполучення двох бортів та донної частини. Типовою послідовністю процесу штампування є: попереднє формоутворення плоскої заготовки, вирізу центрального

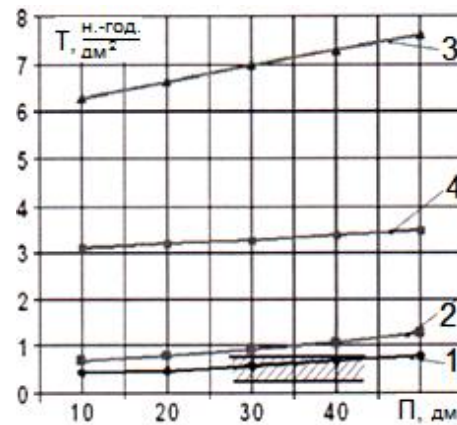


Рис. 2. Залежність питомої трудомісткості обробки (горизонтальна проєкція) штампувої оснастки Т від периметра оснастки П:

1 – плоскі плити з прямими сторонами (традиційний метод шліфування або фрезерування, заштрихована область – одночасне фрезерування довгомірних панелей з алюмінієвих сплавів кількома фрезерними головами); 2 – плоскі плити зі складною поверхнею подвійної кривизни; 3 – формблоки та оправки зі складною поверхнею подвійної кривизни (фрезерування підпорами); 4 – формблоки та оправки зі складною поверхнею подвійної кривизни під час фрезерування на машинах з ЧПУ

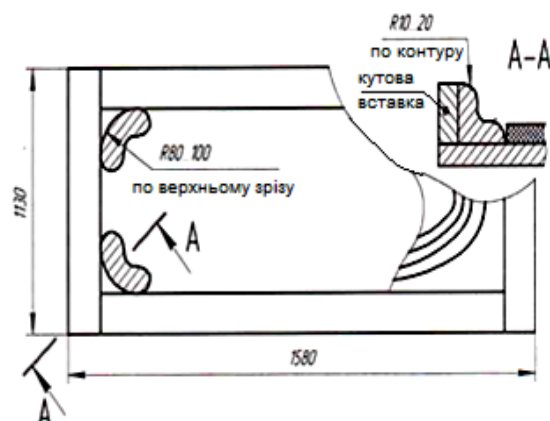


Рис. 3. Характерний вигляд оснастки

отвору та остаточного калібрування. Така послідовність визначається двома факторами – необхідністю формоутворення ділянок сполучення з малими радіусами кривизни та заощадженням листового матеріалу з центрального отвору для повторного використання.

Але поверхня матриці, що відповідає центральному отвору, може бути використана для встановлення та формування інших менших деталей на відповідних формах блоків під час роботи основної частини основної частини.

Успішне проведення загальних технологічних процесів можливе лише при використанні управління потоками енергії при ЕГШ. Таке управління можливе на ЕГ-пресі, наприклад, з багатоелектродними розрядними блоками, наприклад, ЕГ-прес типу ПЕГ-ХАІ-500 [4].

Завдання подальших досліджень полягає у розробці комп'ютерних моделей керування потоками енергії у послідовному штампуванні.

Науковий керівник: к.т.н., професор Тараненко І. М.

Список використаних джерел

1. М. Тараненко. Electrohydraulic forming: theory, equipment, technological processes: monography in 2 Vol., National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, 2011.
2. Тараненко, М. Е. Разработка матмоделей расчета квалиметрических показателей технологичности крупногабаритных листовых деталей / М. Е. Тараненко, А. В. Демченко, А. В. Маковецкий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». 2009. № 1 (57). – С. 70-83.
<http://nti.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/VPPKLA/2009/VPPKLA109/Taranenk.pdf>
3. Войтків, С. В. Универсализация деталей облицовки кузовов автобусов и технологической оснастки для их изготовления / С. В. Войтків, М. Е. Тараненко // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ ; редкол. : А. Н. Туренко (гл. ред.) и др. – Харьков, 2009. – Вып. 25. – С. 212–218.
<https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/493cb005-18fb-4ab8-a77c-981351192d46>
4. М. Тараненко, О. Naryzhniy, О. Zastela & Z. Wang. Operational Experience of Electrohydraulic presses for stamping large-dimensional sheet parts / Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, № 103, 2025. – С. 74-84. doi: 10.32620/oikit.2025.103.06

Гвоздецький В.М.,¹ к.т.н., ст. дослід.
gvosdetcki@gmail.com
Яремчук Д.О.,² аспірант
yaremchukdima@gmail.com
Гасій О.Б.,² д.т.н., доцент
oleksandr.hasiy@nltu.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ШКІВІВ ПАСОВИХ ПЕРЕДАЧ

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна

Постановка проблеми. Пасові передачі є складовою частиною кінематичних схем великої кількості механізмів. Актуальною є проблема зношування та корозійно-механічного руйнування шківів в умовах одночасної дії великих локальних навантажень і високих температур. Деструктивні зміни в поверхневому шарі матеріалу шківів відбуваються за рахунок того, що пас затягує в проміжок між собою і шківом різноманітні речовини залежно від того, в якому середовищі працює певний механізм: пісок, каміння, ґрунт; мікрочастинки деревини, металів і сплавів, ізоляційних матеріалів, інші абразивні компоненти; хімічно активні речовини; мастила, оливи тощо. Знос канавок шківів призводить також і до передчасного зносу пасів.

Аналіз останніх досліджень. Постановка задачі. Метою роботи є огляд останніх досліджень, присвячених поверхневому зміцненню шківів пасових передач.

Невирішена частина загальної проблеми. Останнім часом з метою зменшення загальної маси механізмів шківів зі сталі та чавуну замінюють на такі ж деталі із алюмінієвих сплавів. В той же час переважна кількість робіт присвячена формуванню захисних покриттів на залізобетонних сплавах. Алюмінієві сплави мають низьку температуру плавлення (менше 660 °С), високі ливарні властивості, однак погано опираються абразивному зношуванню. Тому актуальними є дослідження, що мають на меті підвищення ресурсу роботи шківів пасових передач, виготовлених із алюмінієвих сплавів.

Методи підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів

Для підвищення зносо- та корозійної стійкості алюмінієвих сплавів у наш час використовують низку технологій. Із них, на нашу думку, найбільш розповсюдженими є:

- вакуумно-дугове напилення;
- електроіскрове легування;
- анодування.

Вакуумно-дугове напилення. Технологія вакуумно-дугового напилення є результатом еволюції попередніх методів напилення, таких як термічне, катодне (йонне), магнетронне, реактивне електронно-променеве плазмове, активоване реактивне, реактивне іонізаційно-електронне тощо [1].

Перспективними з огляду на потребу поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів є покриття на основі нітридів титану і алюмінію – TiAlN [2]. При збереженні високих фізико-механічних характеристик TiN вони мають високу стійкість до окислення при високих температурах. При нагріванні на повітрі їх поверхня покривається щільним шаром оксиду алюмінію (з мікротвердістю 12...13 ГПа [3]), що перешкоджає подальшому окисленню і адгезійної взаємодії з контртілом. У сплаві Ti-Al-N при 1000 °С існують дві потрібні фази Ti₃AlN і Ti₂AlN. Ti₃AlN має кубічну структуру з параметром ґратки $a = 0,4112$ нм. Вона співіснує з фазами TiN_{1-x}, Ti₃Al і Ti₃AlN. Параметри гексагональної ґратки Ti₂AlN-фази – $a = 0,2991$ нм і $c = 1,3621$ нм. Фаза α -Ti існує при вмісті азоту аж до 30 % [4].

Мікротвердість покриття зростає зі збільшенням вмісту Al, досягаючи максимуму при 60...70 мол. % AlN, після чого знижується значно нижче рівня TiN - до 10 ГПа [5].

Висока термостійкість покриттів TiAlN і створення на їх поверхні шару Al_2O_3 забезпечують значне підвищення працездатності різальних інструментів. Ці покриття більш універсальні щодо оброблюваних матеріалів, ніж TiN, і найбільш ефективні при різанні матеріалів з низькою теплопровідністю, таких як нержавіючі сталі, тверді, титанові і нікелеві сплави [6]. Однак у ряді випадків покриття TiN виявляється кращим за TiAlN [7]. Якщо під час свердління сірого чавуну стійкість свердел з покриттями TiAlN майже вдвічі перевищує стійкість свердел з покриттями TiN, то при обробленні хромистої сталі покриття TiN показало на 10 % кращі результати.

З наведених даних видно, що покриття TiAlN дає добрі результати, коли переважає абразивний знос (оброблення сірого чавуну), і є неефективним при свердлінні з переважанням адгезійного зносу (хромисті сталі), де ефективними є TiMoN, TiCrN, TiNbN.

Проведений аналіз існуючих вакуумних методів нанесення покриттів дає змогу зробити висновок про те, що технологія вакуумно-дугового напилення порівняно з іншими технологіями зміцнення має суттєві переваги, а саме: простота конструкції установки та технологічного процесу, на відміну від складних систем з електронно-променевими гарматами, установки оснащені простими і компактними випарниками; низькі енергозатрати: електрична потужність одного випарника становить 2–5 кВт; висока ефективність процесу, що викликана високим рівнем іонізації парів металів при електродуговому випаровуванні, що становить 20–100 % в залежності від типу металу; чим вища температура плавлення металу, тим вищий відсоток іонізації, що дає змогу більш ефективно керувати потоком плазми; широкі можливості нанесення на поверхню деталі практично будь-яких струмопровідних матеріалів різного типу – карбідів, нітридів, оксидів, чистих металів, композиційних структур, багатокомпонентних і багат шарових конденсатів шляхом напилення одночасно, або по чергово, із кількох випаровувачів; осадження покриттів з сильно іонізованого плазмового потоку високої густини з керованою енергією іонів дає змогу діставати тонкі конденсати високої однорідності, з доброю адгезією з основою, низькою пористістю за заданого температурного режиму; завдяки можливості регулювання основними технологічними параметрами процесу можна керувати структурою і властивостями отриманих покриттів; можливість нанесення покриттів на деталі складної конфігурації; низька шорсткість покриття, яке практично відтворює геометрію поверхні деталі; високі показники мікротвердості, корозійної стійкості, зносостійкості.

До недоліків цього методу слід віднести сам факт необхідності проведення процесу у вакуумній камері обмеженого об'єму; складність і нерівномірність генерування парів із сплавів і легкоплавких металів, а також утворення при горінні дугового розряду поряд з паровою та йонною складовими мікрокраплин металу, які практично хімічно не реагують із легуючими газами та при потраплянні на поверхню металу створюють дефекти покриттів; малу швидкість осадження покриттів (3–10 мкм/год); малу товщину покриття, що вимірюється десятками мікрметрів.

Електроіскрове легування. Процес електроіскрового легування (ЕІЛ) базується на явищах електричної ерозії і полярного переносу матеріалу анода (електрода) на катод (деталь) при електроіскровому розряді. Останній відбувається при зближенні електродів і пробіі міжелектродного заряду між ними. Потік електронів з катода вдаряється до поверхні анода і за рахунок виділення теплової енергії проходить випаровування найбільш розігрітої частини електрода в зоні розряду. Більш віддалена частина електрода, і відповідно, менш розігріта, оплавлюється. Ці продукти викидаються у міжелектродний простір і частина з них закріплюється на зміцнюваній поверхні. Принципово метод ґрунтується на використанні електричної енергії, що виділяється миттєво і характеризується високою температурою каналу іскри (до 1000 °C) та іонізацією міжелектродного проміжку. Оскільки під час одиничного розряду протікають короткі за часом імпульси електричного струму від 10^{-3} до 10^{-5} сек, то відвід тепла не забезпечується теплопровідністю металу, тому його малі об'єми зазнають коливань температури від температури кипіння металів до 20...30 °C.

Дослідження процесу ЕІЛ переважно присвячені питанням заміни ефективних, але дорогих електродних матеріалів типу ТК і ВК на основі карбідів вольфраму, більш дешевими електродами за умови збереження або покращення фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик електроіскрових покриттів (ЕІП). До них, зокрема, належать електродні сплави на основі системи Fe-Mn-C-B у вигляді компактного електроду [8] або порошкового дроту [9] без додаткового оброблення або в сукупності з лазерним оплавленням [10].

Вищевказані роботи стосуються процесу формування ЕІП на сталях різного призначення. Відомі також дослідження з ЕІЛ алюмінієвих сплавів [11]. Початкові низькі показники твердості та зносостійкості таких сплавів покращуються шляхом їх наноструктурування. Зокрема, за рахунок ЕІЛ литих алюмінієво-кремнієвих сплавів АК12 і АК9 електродами з ультрадисперсними порошками твердість ЕІП збільшилась у два рази, а зносостійкість – у три. ЕІЛ сплаву АЛ25 перехідними металами дало змогу у більш ніж три рази підвищити твердість ЕІП. Результати експериментів з ЕІЛ алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом системи Cu-P засвідчили, що мікротвердість збільшилась у 5,3 рази, а зносостійкість – у 1,6 рази. Це може бути пов'язано з утворенням на поверхні сплаву нових інтерметалідних фаз Al_2Cu і Cu_3P , концентрація яких зростає у 9 і 4 рази відповідно. Підвищення зносостійкості у три рази ЕІП із електроду системи Al-Sn на дюралюмінієвому сплаві Д1 системи Al-Cu-Mg досягається за рахунок утворення мікро- та нанониток SnO_2 розміром 3...5 мкм в алюмінієвій матриці. Така структура утворюється внаслідок того, що кристалізація сплаву починається з більш тугоплавких кристалів алюмінію, які витісняють рідке олово до границь зерен, де воно кристалізується у вигляді ниток.

Основні переваги технології електроіскрового легування (ЕІЛ) полягають у можливості переносу на поверхню металів і сплавів будь-яких струмопровідних матеріалів; високій міцності адгезії шару з основою; локальному нанесенні покриття без помітної деформації деталі; відсутності необхідності нагріву всього об'єму виробу.

Недоліками є: високі шорсткості ($R_a = 15-25$ мкм) і пористість; відносно мала продуктивність процесу – 1-2 хв/см² та товщина ЕІП – до 100 мкм із твёрдосплавних електродів і до 200 мкм із електродних сплавів на основі заліза.

Анодування. Анодування - це метод підвищення зносо- та корозійної стійкості металевих виробів шляхом формування шару оксиду на його поверхні. Процес створення цього захисного оксидного покриття відбувається електролітично. Виріб, який обробляється, є в цьому електролітичному процесі анодом. Залежно від призначення анодного покриття і застосовуваного процесу анодування можна отримувати анодне покриття з різними характеристиками. Анодне покриття, яке може вирости на алюмінієвому виробі, здатне мати товщину в 100 разів більше, ніж оксидне покриття, яке утворюється на алюмінії природним шляхом.

Для забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик застосовують такий різновид анодування як тверде анодування, яке дає змогу утворювати захисний шар товщиною до 150 мкм, і для якого, на відміну від архітектурного та декоративного анодування, зовнішній вигляд не має значення. Воно проводиться при знижених, часто від'ємних, температурах електроліту [12-14].

Пористість є однією з основних характеристик анодних оксидних покриттів, що визначає їх фізико-хімічні та механічні властивості. Вона змінюється в залежності від швидкості хімічного розчинення анодної плівки до швидкості її утворення, а ці фактори, в свою чергу, залежать від типу електроліту, умов анодування і хімічного складу анодованого сплаву. Пористість товстих плівок на технічному алюмінії при температурах H_2SO_4 від -6 до +10 °C, щільності струму від 2 до 6 А/дм² становить 10-15%. З факторів, що сприяють зменшенню об'ємної пористості, слід вказати на зниження температури анода, зменшення агресивності і, зокрема, концентрації електроліту, зменшення гетерогенності в структурі алюмінієвого сплаву і збільшення напруги.

Твердість покриття є важливим критерієм здатності до опору руйнуванню. Товсті анодні плівки на чистому алюмінії і деяких його гомогенних сплавах, сформовані при низьких температурах, мають мікротвердість 600 HV, яка співмірна із твердістю загартованої та відпущеної при 300 °C інструментальної сталі ШХ15. Суттєво впливає на твердість анодних плівок температура ванни. Як правило, з підвищенням температури ванни твердість плівки зменшується. У дуже товстих плівок спостерігаються помітні відмінності в твердості всередині однієї і тієї ж плівки, між зоною, що прилягає до металу, і зоною, що прилягає до поверхні. Найбільш твердими є оксидні шари, прилеглі до металу. Це стає зрозумілим, якщо врахувати, що нові шари оксиду утворюються на внутрішній поверхні плівки, внаслідок чого раніше утворені зовнішні шари піддаються більш тривалому впливу H_2SO_4 в процесі електролізу, а це сприяє збільшенню гідратації і пористості і, отже, зниження твердості. Твердість анодної плівки товщиною 170 мкм на технічному алюмінії становила 600HV для внутрішньої зони і 440HV для зовнішньої; твердість плівок товщиною 70 мкм на сплаві АК4 знижувалася від внутрішньої зони до зовнішньої з 335 до 305HV.

Зносостійкість анодних плівок збільшується із зростанням їх товщини. Із збільшенням товщини оксидної плівки в 4,5 рази (з 44 до 196 мкм) абсолютний знос зменшився в 1,8 рази (з 37,9 до 20,5 мг) і став тільки на 19 % більшим, ніж у сталі ШХ15.

Ерозійна стійкість покриттів визначає опір їх руйнуванню під дією швидкісного потоку абразивних частинок. Тверді оксидні плівки, одержані методом товстошарового анодування, мають ерозійну стійкість, у 28...62 рази більшу, ніж плівки, одержані за звичайним методом анодування в сірчаній кислоті за кімнатної температури. Товстошарові покриття добре протидіють ударній і сколюючій дії твердих частинок піску, кінетична енергія яких недостатня, щоб проломити товстий міцний шар оксиду. Питома ерозійна стійкість більш товстого твердого оксиду дещо менше, ніж твердість тоншого оксидного шару, що, мабуть, пояснюється тривалішим впливом сірчаної кислоти на зовнішній шар покриття в процесі анодного окислення.

Загалом, шківів, зміцнені методом холодного анодування мають високий експлуатаційний ресурс, не менший, ніж у шківів, виготовлених із гартованої інструментальної сталі ШХ15.

Висновок. У підсумку можна констатувати, що кожен охарактеризований метод поверхневого зміцнення може застосовуватись залежно від умов експлуатації та сфери застосування деталі чи інструменту. Якщо брати до уваги потребу в устаткованні для одержання покриттів, стан поверхні після їх нанесення та необхідність додаткового оброблення, продуктивність процесу, то найбільш оптимальним варіантом для підвищення працездатності шківів є тверде анодування.

Список використаних джерел

1. Голубець В. М., Гасій О. Б., Щуйко Я. В. Захисні властивості і зносостійкість вакуумних йонно-плазмових покриттів. Львів: Логос, 2008. 104 с.
2. Андреев А. О., Павленко В. М., Сисоев Ю. О. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів: підручник. Харків: Нац. аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2018. 288 с.
3. Homberg. Interrelationship between processing coating properties and functional properties of steered arc physically vapour deposited (TiAl)N and (TiNb)N coatings / J. R. Roos et al. *Thin Solid Films*. 1990. V. 193/194. P. 547 – 556.
4. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review. *Materials Science and Engineering*. 2003. V. A342. P. 58 – 79.
5. Ikeda T., Satoh H. Phase formation and characterisation of hard coatings in the Ti-Al-N system prepared by the cathodic arc ion plating method. *Thin Solid Films*. 1991. V. 195. P. 99 – 110.
6. Comparison of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures / T. Polcar, T. Kubart, R. Novak et al. *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 193. P. 192 – 199.

7. Ternary (Ti,Al)N and (Ti,Nb)N coatings produced by steered arc ion plating / J. P. Celis et al. *Metal Finishing*. 1993. P. 19 – 22.
8. Pashechko M. I., Golubets' V. M., Gasii O. B., Chaikovs'kii B. P. Properties of eutectic electrode materials for electrospark alloying. *Soviet Materials Science*. 1991. 27(1). P. 47-51.
9. Голубець В. М., Пашечко М. І., Гасій О. Б., Шпуляр Ю. С. Електродні матеріали для електроіскрового легування у контексті трибоматеріалознавства. Львів: ВД «Панорама», 2023. 104 с.
10. Голубець В.М., Білоус О.В. Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним електроіскровим легуванням і лазерною обробкою. *Проблеми трибології*. 2001. №2. С. 56-61.
11. Зінченко І. Д. Дослідження структури та властивостей захисних покриттів на алюмінієвих сплавах: кваліфікаційна робота магістра: спеціальність 132 «Матеріалознавство» / Сумський державний університет. Суми, 2020. 84 с.
12. Student M., Pohrelyuk I., Padgurskas J., Rukuiža R., Hvozdet's'kyi V., Zadorozhna Kh., Veselivska H., Student O., Tkachuk O.. Abrasive wear resistance and tribological characteristics of pulsed hard anodized layers on aluminum alloy 1011 in tribocontact with steel and ceramics in various lubricants. *Coatings*. 2023. Vol. 13, Is. 11. P. 1883.
13. Bononi M., Giovanardi R. and Bozza A. Pulsed current hard anodizing of heat treated aluminum alloys: frequency and current amplitude influence. *Surface and Coatings Technology*. 2016. 307. P. 861–870.
14. Jensen F., Gudla C. V., Kongstad I. and Ambat R. High frequency pulse anodising of aluminium: Anodising kinetics and optical appearance. *Surface and Coatings Technology*. 2019. 360. P. 222–231.

ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ ДЛЯ РОТОРА ДВИГУНА МАЛОГАБАРИТНОГО БПЛА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Частота обертання ротора сучасних турбокомпресорів може досягати 200 000 об/хв і більше [1]. Навантаження на опорні підшипники визначаються відцентровими силами від невіднованих мас ротора, навантаженнями при запуску та еволюціях, гіроскопічним моментом, а також газодинамічними сил, що діють на ротор з боку компресора та турбіни.

У турбокомпресорах застосовують підшипники кочення або підшипники ковзання. Підшипники кочення, хоча мають більш високий механічний коефіцієнт корисної дії, працюють не надійно, крім того необхідна автономна система змащування.

У цій роботі розглянуто один із існуючих двигунів малогабаритного БПЛА (рис.1), у якого як опори ротора використовуються підшипники кочення.

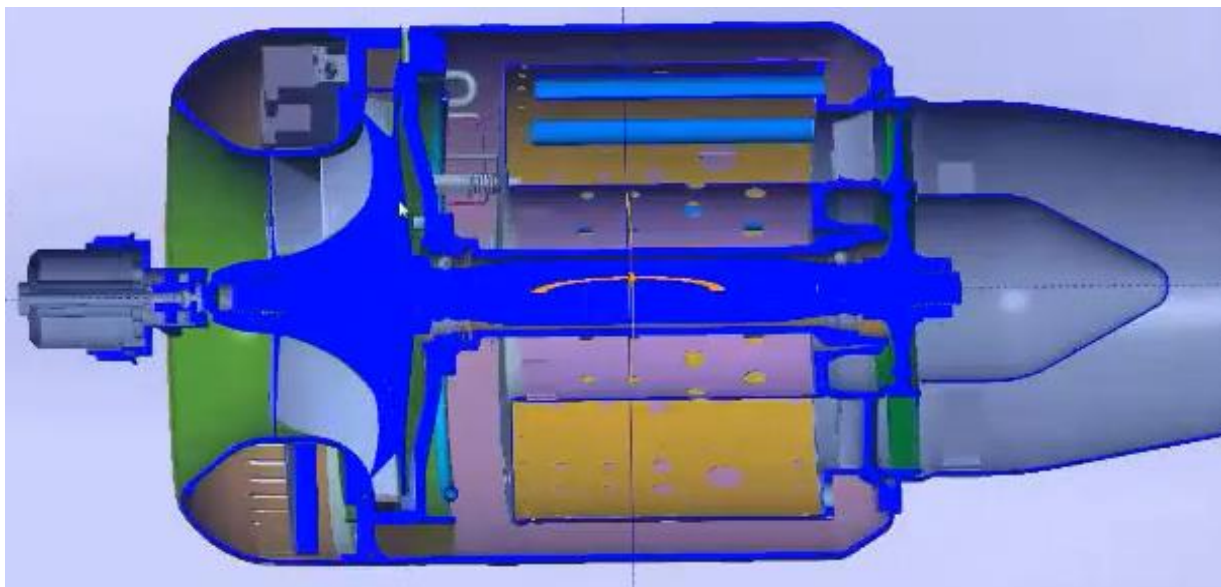


Рис. 1

Зроблено спробу замінити існуючі підшипники на підшипники ковзання гідродинамічного типу. В даному випадку автономну систему змащування можна виключити, і підведення мастила до підшипників здійснювати під тиском із системи подачі палива (гасу). Крім функції змащування та охолодження, масляна плівка у підшипниках ковзання служить у ролі демпфера, який сприяє стабільній роботі валу ротора турбокомпресора.

Ротор турбокомпресора встановлено на опорних (радіальних підшипниках), які зазвичай виконуються у вигляді двох бронзових плаваючих втулок. Крім того, передбачено упорний підшипник, який запобігає осьовому переміщенню ротора. Радіальні підшипники обертаються з проміжною частотою, що дозволяє працювати на різних режимах без прямого контакту між підшипником та валом.

Для проєктування опор були використані такі дані:

- частота обертання ротора: 100 000 об / хв;
- маса ротора: 0,8 кг;
- максимальне радіальне навантаження: 2 500 Н;

– осьове навантаження: 450 Н.

Були розраховані основні характеристики радіальних та упорних підшипників: робочі зазори, витрата мастила та втрати потужності на тертя.

Нижче наведено отримані результати, на підставі яких розроблена конструкція опор.

Розрахункова схема радіального підшипника з плаваючою втулкою показана на рис. 2. Габаритні розміри були прийняті таким чином, щоб максимальний діаметр підшипника дорівнював зовнішньому діаметру зовнішнього кільця підшипника кочення.

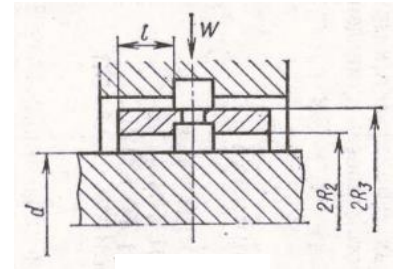


Рис. 2

В результаті розрахунків знайдено безрозмірні значення ексцентриситетів для зовнішнього та внутрішнього шарів $\chi_1 = 0,58$ та $\chi_2 = 0,75$. Тоді робочі зазори відповідно $h_{min1} = 8,4$ мкм та $h_{min2} = 5$ мкм.

Витрата змащувальної речовини через один підшипник дорівнює $69,7 \text{ см}^3/\text{с}$, втрати потужності – $3,6 \text{ кВт}$.

Розглянуто упорний підшипник гідродинамічного типу з похилими поверхнями (рис. 3). Були прийняті такі розміри: внутрішній діаметр – 26 мм, зовнішній – 60 мм, похилих поверхонь – 5.

Виявлено, що мінімальний зазор, який відповідає заданому навантаженню, становить 36 мкм, витрата мастила $20 \text{ см}^3/\text{с}$ та втрати потужності $0,4 \text{ кВт}$.

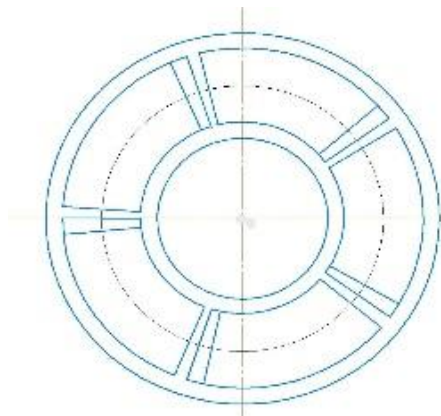


Рис. 3

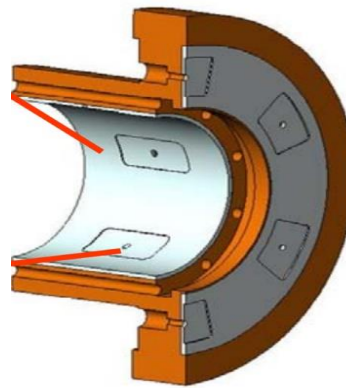


Рис. 4

На рис. 4 представлений варіант конструкції радіально-упорного підшипника, який спроектований за даними розрахунку, і який необхідно інтегрувати в конструкцію двигуна.

Друга опора ротора – радіальний підшипник з плаваючою втулкою.

Список використаних джерел

1. Dutczak, J. (2016). Micro turbine engines for drones propulsion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 148. 10.1088/1757-899X/148/1/012063.

Кубіч В.І.,¹ к.т.н., доцент
schmirung@gmail.com
Фасоль Е.О.,¹ старший викл.
selvluna@gmail.com
Чернета О.Г.,² к.т.н., доцент
OCherneta@gmail.com

ПІДХОДИ ДО ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЯВУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЩНИХ ПОКРИТТІВ У ВУЗЛАХ ГТУ

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

²Дніпровський державний технічний університет, Каменське, Україна

Вступ. Безпека, надійність та економічність технічного використання газотурбінних установок (ГТУ) визначається низкою факторів впливу. Одним з них є збереження оптимального зазору між деталями вузлів, які мають контури з використанням широкого спектру покриттів-ущільнювачів. До таких вузлів відносяться: «торець лопатки – корпус турбіни, компресора», лабіринтне ущільнення турбіни. Відомі технічні рішення щодо підтримки радіальних зазорів на мінімальному рівні шляхом застосування активних систем керування дозволяють знизити їх величину на всіх режимах роботи ГТУ. Перспективним шляхом вирішення зазначеної задачі є використання ущільнювальних припрацьовувальних покриттів нового покоління. Їх основною особливістю є низька твердість на етапі припрацювання, що дає можливість безпечного врізання торця лопатки або гребінців лабіринтного ущільнення та забезпечення мінімального радіального зазору. Після етапу припрацювання твердість перспективного покриття, що розробляється, збільшується за рахунок прогнозованих структурно-фазових перетворень, що забезпечує наступну високу стійкість до ерозії та газоабразивного зношування. Виявлення таких механічних властивостей передбачається на етапах проведення експериментальних досліджень, для яких потрібне відповідне випробувальне лабораторне обладнання. Удосконалення існуючого устаткування з цією метою безумовно актуальне під час вирішення завдань трибологічного забезпечення таких досліджень. При цьому прояв службових властивостей згаданих покриттів має бути пов'язаний із можливістю відтворення умов їхньої роботи на деталях ГТУ.

Метою роботи є аналіз існуючих розробок випробувального обладнання для моделювання процесів контактної взаємодії між деталями газотурбінних установок в умовах, наближених до експлуатаційних. Запропоновані технічні рішення дозволять визначитися із повнотою імітування зміни силового, швидкісного та температурного навантаження об'ємів матеріалів деталей, у тому числі і покриттів, на етапах відповідних експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій по розглянутому питанню. Фізичне моделювання процесу врізання пластинчастого зразка в тіло досліджуваного матеріалу застосовано авторами у роботах [1-3]. При цьому використана класична схема тертя «нерухома колодка з досліджуваним покриттям – диск, що обертається, з інструментом руйнування». Дослідниками використовувалася високошвидкісна випробувальна установка для тертя, яка імітувала умови роботи кількох ущільнень. Основний акцент робився на встановлення закономірностей зношування покриттів у широкому діапазоні зміни швидкостей ковзання диска з лезами (від 30 до 150 м/с) при керованих значеннях врізання у матеріал покриттів – до 400 мкм. Однак фактори керування силою врізання при заданій швидкості ковзання і температурного стану середовища фрикційної взаємодії не враховувалися. Обладнання дозволяло тільки вимірювати поточні значення нормальної, дотичної контактної сили і температури в зоні тертя. Застосування подібної схеми, умов і режимів взаємодії зразків для оцінки, наприклад, жароміщних покриттів, що приробляються, не є повною мірою прийнятним, оскільки моделюється тільки окремо взятий режим роботи ГТУ.

Методика оцінки зносостійкості покриттів, яка описана в статті [4], зводиться до вимірювання втрати маси зразків-імітаторів статора при моделюванні суцільної ударної взаємодії зі зразками-імітаторами пластин, які закріплюються на диску, що обертається. При цьому середньостатистичний шлях тертя при чирканні-співударі становить $l = 0,015$ м і не контролюється сила притискання при взаємодії. Більш того, миттєва контактна взаємодія представляється розподіленою по площі торкання, що зумовлює її патологічне поверхневе руйнування (дряпання, вигладжування) і не створює передумов для оцінки зношування за глибиною. Останнє важливе для оцінки прояву міцності когезійних зв'язків між структурними компонентами покриття, оскільки нормальні тиски при таких зсувних деформаціях малі. Інакше б проявляв себе зрив кріплення пластин. Також середовище взаємодії відкрите, що не передбачає збирання та обробку інформації про продукти зношування та їх зв'язок зі станом приповерхнево-об'ємних структур, що формуються. Останні просто неможливо зібрати. Таке моделювання не передбачає наявності замкнутої взаємодії покриття з пластиною, яка розподілена по внутрішньому циліндричному периметру, наприклад, корпусу відсіку ГТУ, з урахуванням неконтрольованої контактної взаємодії. Тобто, за допомогою наведеного обладнання відтворюється примусове торкання з покриттям без урахування прояву розподілу його властивостей по циліндричному контуру статора силової (компресорної) турбіни відповідно до технології нанесення.

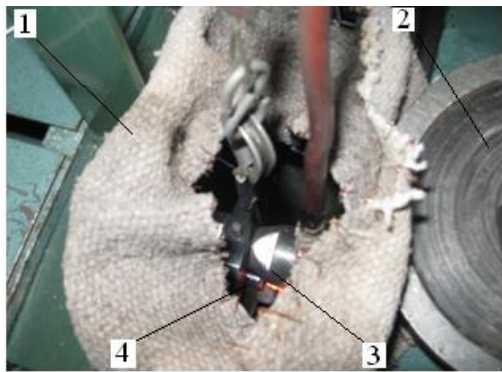
У роботі [5] закладено основи методологічного забезпечення досліджень механічних властивостей припрацьовувальних покриттів, заснованих на фізичному моделюванні процесу врзування гребінців рухомої частини ущільнювального контуру в тіло покриття, сформованого на нерухомій частині. При цьому запропоновано методику оцінки жароміцних припрацьовувальних покриттів у температурних умовах $25 - 35^\circ\text{C}$ при відносно малому швидкісному режимі взаємодії досліджуваних зразків $n = 300$ хв⁻¹. Параметрами оцінки властивостей покриттів виступали динамічний коефіцієнт тертя, енергетична інтенсивність зношування матеріалів покриття за масою. При цьому основний акцент триботехнічних випробувань ставився на визначенні тенденцій прояву опору врзанню зубців на диску, що обертається, у випробуваний матеріал при автоматичному розвантаженні контакту. В результаті таких випробувань було встановлено підвищену сипкість та крихкість досліджуваних матеріалів, що не давало можливості розширити діапазон навантажень. Покриття дуже швидко зношувалися, і зубці дисків доходили до основи колодки. При цьому була відсутня можливість повторного використання колодок у вигляді пластин з напиленим матеріалом, оскільки при імітуванні структурно-фазових перетворень при нагріванні до 1100°C відбувалося відшаровування покриття від колодок. Загалом у методиці випробувань оцінка контактної взаємодії за умов безперервного розігріву середовища взаємодії не передбачалася, що було істотним недоліком.

У роботі [6] авторами запропоновано методику досліджень з використанням випробувальної камери, яку монтували відносно випробуваних зразків. Фрикційний контакт моделювався між рухомих зразком – диском із зубцями на його зовнішній поверхні та нерухомою малогабаритною колодкою, на поверхні якої формувалося досліджуване покриття (рисунки 1). При цьому визначалися фрикційні характеристики контакту за динамічним коефіцієнтом тертя та зношування матеріалу покриття за втратою маси. Дослідження мали такі обмеження:

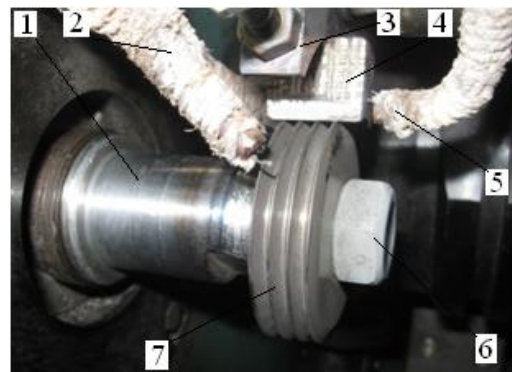
- неможливість імітування різкого збільшення швидкісного режиму взаємодії, оскільки машина тертя СМЦ-2, на якій проводилися випробування, не дозволяла виконувати цю операцію без переривання досліду;

- неможливість створення плавного силового навантаження, оскільки зубці стрімко врзалися своєю основою в тіло покриттів;

- обмежена можливість повторного використання зразків після примусової термічної обробки для забезпечення прогнозованих структурно-фазових перетворень, оскільки у 50–60% зразків відбувалося відшаровування покриттів від підкладки колодок.



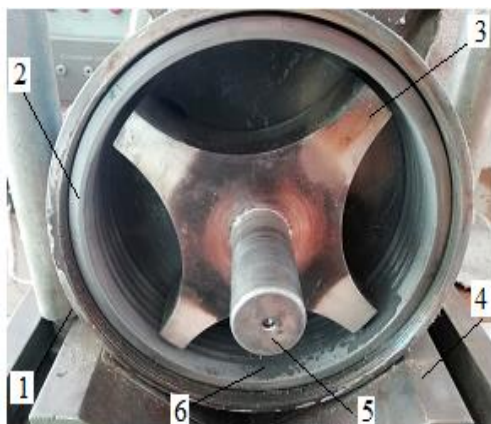
а



б

Рис. 1. Обладнання машини тертя СМЦ-2 для триботехнічних випробувань малогабаритних зразків у жаровій камері: а – фрагмент корпусу камери, обгорнутий азбестовим полотном: 1 – полотно; 2 – вантаж; 3 – верхній вал машини; 4 – зразок-колодка з покриттям; б – контакт зразків диска з колодкою: 1 – нижній вал машини; 2 – кожух термопар; 3 – тримач; 4 – зразок-колодка з покриттям; 5 – кожух термопар; 6 – гайка фіксації; 7 – зразок-диск із гребінцями

В основу подальшого розвитку фізичного моделювання досліджуваного процесу тертя покладено уявлення про існування подібних за механічною взаємодією фізичних явищ у натурному газотурбінному двигуні, зокрема між гребінцями торців лопаток і покриттям корпусу силової турбіни (і, можливо, компресорного відсіку) газодинамічної випробувальної камери (рисунк 2). У цій камері гребінці вільно посаджених у роторі пластин механічно взаємодіють із внутрішньою циліндричною поверхнею матеріалу кілець [7]. Такий підхід, на нашу думку, максимально наближує моделювання до реальних умов термомеханічного навантаження дослідних покриттів.



а



б

Рис. 2. Випробувальна камера:

а – загальний вигляд без передньої кришки: 1 – корпус камери; 2 – зразок-кілець; 3 – ротор; 4 – опорна станина стенду; 5 – вал підшипника ротора; 6 – продукти зношування покриття; б – крило ротора з пластиною: 1 – зразок-кілець; 2 – корпус крила ротора з внутрішнім пазом; 3 – пластина з гребінцями; 4 – нижній гвинт фіксації зразка-кілець

Для виконання фізичного моделювання запропоновано використовувати таке обладнання:

– стенд для випробування генераторних установок Hıradastechniki Gergyara U-808 серія № 326 автомобільних двигунів кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка».

Стенд має два режими керування зміною частоти обертання приводного валу: 300–2500 хв⁻¹ та 2500–5000 хв⁻¹ (рисунок 3). Завдяки наявності перемикачів частотних режимів можливо швидко збільшувати частоту обертання приводного валу в два рази, наприклад, з 500 хв⁻¹ до 1000 хв⁻¹, з 800 хв⁻¹ до 1600 хв⁻¹ тощо. Це створює умови для моделювання миттєвого врізання зубців пластин у матеріал покриття і збільшення притисної сили, зокрема при фіксованих температурах середовища взаємодії.

На станину стенда для закріплення генератора замість генератора встановлюється випробувальна камера з ротором, в якій розміщуються:

- зразок-кілець з покриттям, яке наноситься на внутрішню циліндричну поверхню;
- ротор із рухомими пластинами з зубцями;
- мультиметри DT-838 з термопарою TP-01 – 2 од.;
- термоізоляція.

Для створення температури середовища взаємодії покриття із зубцями пластин використовується промисловий газ ізобутан-бутан у товарних балончиках із пальником.

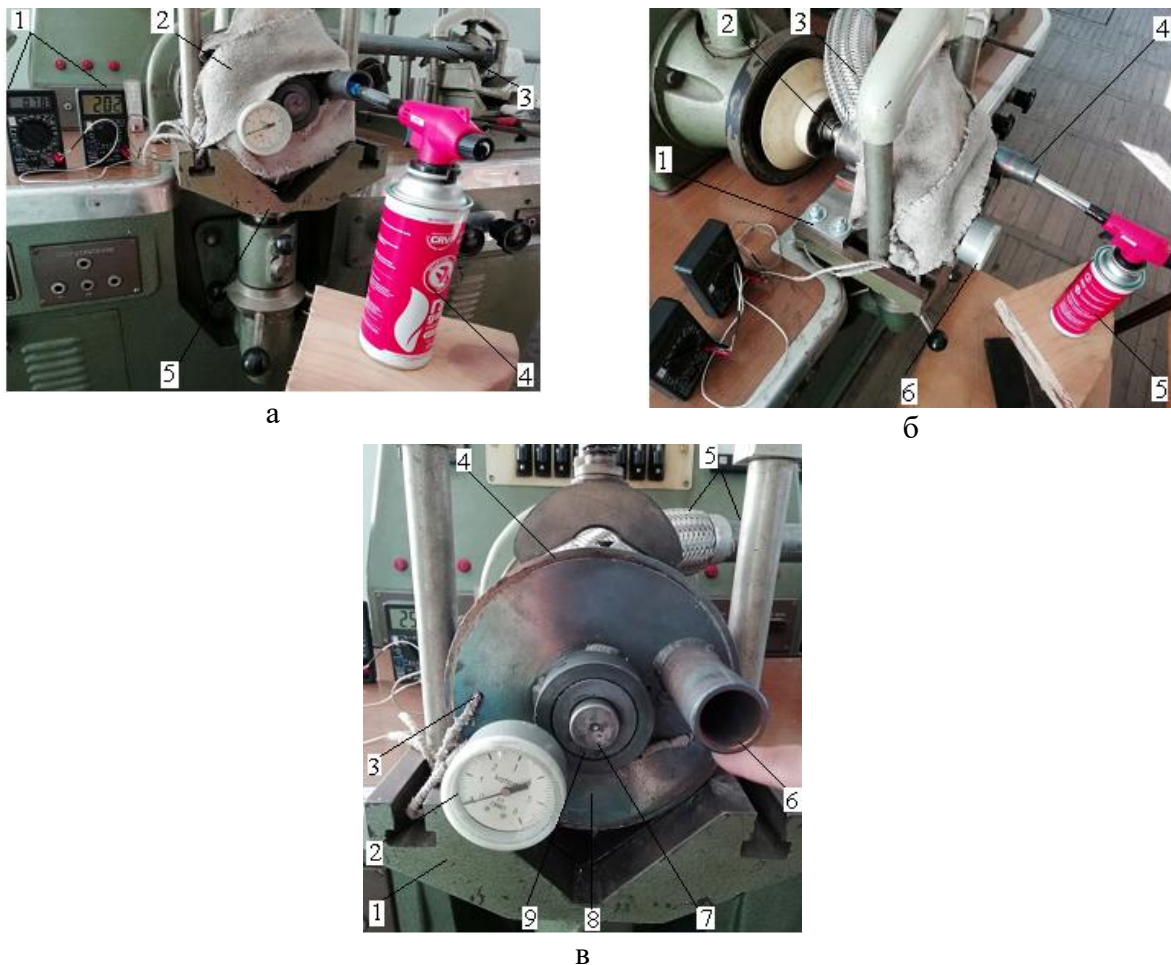


Рис. 3. Установка для випробувань:

- а – вигляд спереду; 1 – мультиметри; 2 – ізоляція; 3 – вивідна труба; 4 – балон із ізобутаном-бутаном; 5 – станина стенду; б – вид зверху: 1 – бічні опори корпусу камери; 2 – вал ротора; 3 – випускна гофра; 4 – впускний патрубок; 5 – балон із ізобутаном-бутаном; 6 – манометр; в – камера без ізоляції: 1 – станина стенду; 2 – манометр; 3 – провід термопар; 4 – корпус камери; 5 – гофра із випускною трубою; 6 – впускний патрубок; 7 – вал ротора; 8 – кришка камери; 9 – підшипник валу

Висновки. Виконаний аналіз підходів до фізичного моделювання тепломеханічного навантаження поверхонь деталей ГТУ, зокрема з досліджуваними жароміцними припрацьовувальними покриттями, показав повноту врахування дослідниками особливостей

їхньої контактної взаємодії. Кожне з наведених лабораторних устаткувань безумовно значуще та має сенс для відповідних експериментальних досліджень, а їх вибір визначається авторами.

Наприклад, з використанням випробувальної камери вже виконано фізичне моделювання тепломеханічного навантаження покриттів системи КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y з вмістом ітрію 0,1% [7], сформованих на внутрішніх циліндричних поверхнях зразків-кілець двома технологіями – газополуменевим та іоноплазмовим напиленням. Визначено тенденції зміни параметрів їх зношування, зумовлених неоднаковим проявом фізико-механічних властивостей. При цьому окремо відтворювалися можливі етапи контактної взаємодії поверхонь статора з покриттями та лопатками ГТУ, які були розгорнуті в часі й прогнозовано характерні для їхніх експлуатаційних умов роботи.

Список використаних джерел

1. N. Fois, M. Watson and M.B. Marshall. The influence of material properties on the wear of abradable materials. *Journal of Engineering Tribology*. June 5, 2016. Volume 231, Issue 2.
2. Siyang GAO, Weihai XUE, Deli DUAN, Shu Li. Tribological behaviors of turbofan seal .couples from friction heat perspective under high-speed rubbing condition/*Friction* 4(2): 176–190 (2016).
3. Stringer J and Marshall MB. High speed wear testing of an abradable coating. *Wear* 2012; 294–295: 257–263.
4. Красников А.О., Торба Ю.И., Занин А.Е., Климик Р.Р. Проверка износостойких и прирабатываемых покрытий. *Вестник двигателестроения*. № 2. 2018. С.179–185.
5. Boguslaev, V.O., Greshta, V.L., Tkach, D.V., Lekhovitser, Z.V., Klymov, O.V. Evaluation of the Tribotechnical Characteristics of Therma-Barrier Sealing Coatings under Critical Loads/*Journal of Friction and Wear*, 2019, 40(1), P. 80–87.
6. Boguslaev, V.O., Greshta, V.L., Kubich, V.I., Fasol, Ye.O., Lekhovitser, V.O. Effect of alloying heat-resistant packing coatings on their tribotechnical, physical and mechanical properties/*Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, (6), P. 41–47.
7. Kubich, V.I., Pavlenko, D.V., Fasol Y.O., Syvachuk, O.V. Comparison of High-Temperature Wear Resistance of Gas-Flame and Ion-Plasma Sealing Coatings with 0.1% Yttrium. *Tribology in Industry*. Vol. 46, No. 3 (2024), P. 486–498.

ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ФЕРМЕННИХ КОНСТРУКЦІЙ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Одним з основних напрямків розвитку космічних апаратів (КА) «служби» Землі є підвищення точності орієнтації КА на наземні орієнтири та роздільну здатність цільової апаратури.

Зазначені тенденції накладають певні вимоги і на конструкцію КА, тобто вимагають більш точної та стабільної «прив'язки» цільової апаратури до датчиків орієнтації КА.

На прикладі розвитку космічних апаратів розробки ДКБ «Південне» можна оцінити еволюцію вимог до взаємної прив'язки цільової апаратури та датчиків орієнтації. Для КА розробки 60-х її величина становила 30 кут. хв. (КА «11Ф619»), на КА розробки 80-х років - 15 кут. хв. (КА «11Ф644»), на КА розробки 90-х років - 2 кут. хв. (КА «Либідь»), на КА розробки 2000 року - 4 кут. сек. (телескоп КА «Січ-2»).

Основним дестабілізуючим фактором у процесі експлуатації КА на орбіті є температурні деформації конструкції внаслідок постійно діючих термоциклів «нагрів-охолодження». З цієї причини і виник закономірний інтерес як вітчизняних, так і зарубіжних космічних фірм до нових конструкційних матеріалів, що мають низьку температурну деформованість. Такими матеріалами є інварні сплави та вуглепластик. Якщо інварні сплави мають щільність 8 г/см^3 , то цей параметр у вуглепластика становить $1,45 \text{ г/см}^3$. До того ж цей матеріал має високі пружно-міцнісні характеристики.

Саме ці властивості вуглепластика дозволяють використовувати його у розміростабільних фермових конструкціях КА. Однак до цього часу недостатньо вивчено вплив факторів космічного простору на властивості вуглепластику з часом.

Виходячи з вище сказаного, для успішного використання вуглепластика як матеріалу силових конструкцій космічного апарату необхідно вивчити вплив термоциклів на зміну геометричних параметрів конструкцій з вуглепластику протягом тривалого часу.

Мета роботи – дослідження та оцінка впливу теплових навантажень різної інтенсивності та тривалості на розміростабільність фермових конструкцій для космічних апаратів.

Вибір конструктивно-компонувальної схеми фермової конструкції

При виборі конструктивно-силової схеми експериментальної ферми, призначеної для ресурсних випробувань, керувалися такими вимогами:

- використання найбільш перспективних технологій, а саме - автоматизації процесу намотування волокна;
- застосування перспективних форм конструктивних елементів ферми у вигляді труби прямокутного перерізу та фітингів з ортогональними променями;
- вибір конструктивно-силової схеми ферми, що має максимальну жорсткість, що забезпечується наявністю діагональних розкосів на кожній грані ферми;
- вибір простої конструктивно-компонувальної схеми ферми у формі паралелепіпеда.

Вибір матеріалів, технології виготовлення та схеми армування стрижнів

Традиційними матеріалами виготовлення ферменних конструкцій є сплави алюмінію. Однак сучасні вимоги до ферм, що використовуються на космічних літальних апаратах (мінімальна маса, максимальна жорсткість, мінімальна деформованість при проходженні циклу «нагрів-охолодження»), передбачають застосування нового класу матеріалів – композиційних пластиків на основі скло-, вугле- або органонаповнювачів. У табл. 1 наведено характеристики зазначених матеріалів у порівнянні з алюмінієвим сплавом.

Таблиця 1 – Характеристики композиційних матеріалів у порівнянні з характеристиками алюмінію

Марка матеріалу	Руйнівне напруження при розтягуванні, σ_b , МПа	Модуль пружності при розтягуванні, E_b , ГПа	Щільність, ρ , г/см ³	КЛТР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C
Склопластик ВПС-13	475	22	1,9	6,7
Орґанопластик ЖСВМ-5+ЕДТ-10	2060	78	1,35	-6,5
Вуглепластик УКН-5000+УП-354	1056	138	1,45	0,8
Алюмінієвий сплав АМг-6	320	72	2,64	24,6

Труби та фітинги виготовлялися з вуглецевого джгута УКН/5000, просоченого епоксидним зв'язуючим ЕДТ-10 «мокрим» способом за технологією автоматизованого намотування.

З метою зниження коефіцієнта лінійного термічного розширення (КЛТР) трубчастих елементів було проведено аналіз раніше розроблених схем армування. Контроль КЛТР проводився у діагностичній галузевій лабораторії голографії Дніпровського національного університету ім. О. Гончара (ДНУ). Результати даних випробувань наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати випробувань стрижнів на КЛТР

Номер стрижня	$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°C				Середнє значення
	Вимірювання 1	Вимірювання 2	Вимірювання 3	Вимірювання 4	
1	0,751	1,52	1,52	1,25	1,25
2	0,751	0,751	1,126	0,751	0,84
3	1,52	1,52	1,52	1,877	1,59
4	0,675	0,45	0,5	0,3	0,5
5	1,52	1,877	1,5	1,126	1,502
6	0,3	0,35	0,3	0,45	0,35
7	1,05	1,35	1,25	1,35	1,25

При виборі схеми армування враховувалися такі критерії: забезпечення мінімального КЛТР та міцності, що регламентується.

Проведено роботи щодо вибору оптимальної схеми армування за критерієм мінімального КЛТР. Результати досліджень дозволили отримати залежності КЛТР, міцності та маси трубчастих елементів від схеми армування.

Методики теплових випробувань модельної ферми

Випробування включали кілька серій термоциклічних навантажень модельної ферми різної інтенсивності та тривалості. Для оперативної оцінки впливу різних видів навантажень на геометричні параметри ферми виникла необхідність у створенні методики та відповідного інструменту, що дозволяє виміряти зміну габаритних розмірів ферми з точністю до 2 мкм та кутових деформацій з точністю до двох кутових секунд.

У ДНУ було розроблено методику вимірювання кутових деформацій модельної ферми при теплових випробуваннях. Зазначена методика передбачала пряме вимірювання змін лінійних розмірів ферми між контрольними поверхнями, розташованими на одному поздовжньому трубчастому елементі за допомогою спеціально розробленого та виготовленого мікрометра.

У процесі досліджень ферма зазнавала впливу теплових навантажень – циклів нагріву від +20 до +65°C. Після кожні 10 циклів нагрівання ферма термостабілізувалася протягом доби при температурі $T = 20 \pm 0,1^\circ\text{C}$, після чого проводилися виміри.

Під кутовими деформаціями ферми в даній методиці розуміються зміни кутів φ_m^{kj} , що зображені на рис. 1.

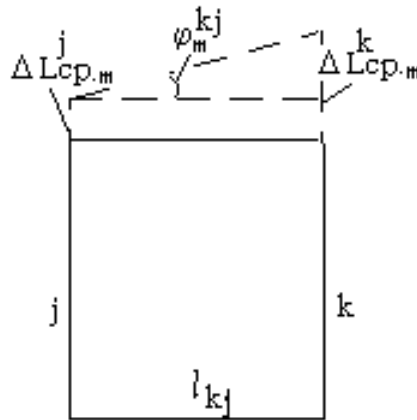


Рис. 1. Визначення кутових деформацій ферми

Кутові деформації обчислюються за формулою

$$\varphi_m^{kj} = \frac{\Delta L_{cp.m}^k - \Delta L_{cp.m}^j}{l_{kj}} \cdot 3,439 \text{ (кут. хв.)}, \quad (1)$$

де l_{kj} – відстань у мм між центрами опор труб із номерами k та j ; $\Delta L_{cp.m}^j$ – середнє значення збільшення довжини j -го стрижня на m -м етапі випробувань, виміряне в мікрометрах.

Методика встановлює правила та порядок проведення вимірювання змін лінійних розмірів ферми, правила обчислення зміни кутових розмірів, а також вимоги до робочого місця та персоналу.

Розроблена методика задовольняє вимогам, що регламентуються, і дозволяє виміряти лінійні зміни розмірів ферми з точністю до 2 мкм і кутові деформації з точністю до 2-х кутових секунд.

Працездатність методики була підтверджена під час аналізу змін геометричних параметрів ферми, що відбулися після серії термоциклічних навантажень.

Теплові випробування модельної ферми та їх результати

Проведено термоциклічні випробування модельної ферми. Кожен цикл навантажень включав нагрівання ферми від температури 20 до 65°C, витримку в печі при температурі 65°C протягом 1 години і подальше охолодження до 20°C.

Після проведення термоциклювання проводилися вимірювання змін геометричних параметрів модельної ферми відповідно до розробленої методики.

За результатами вимірювань обчислювалися середні значення подовжень чотирьох труб, КЛТР та кутові деформації на одному етапі термоциклювання за формулами

$$\Delta L_{cp}^{\Sigma} = \frac{\Delta L_{cp}^1 + \Delta L_{cp}^2 + \Delta L_{cp}^3 + \Delta L_{cp}^4}{4} \quad (2)$$

$$\alpha_{cp}^{\Sigma} = \frac{\Delta L_{cp}^{\Sigma} \cdot 10^{-6}}{L \cdot (T_2 - T_1)} \quad (3)$$

$$\varphi_{cp}^{\Sigma} = \frac{\varphi_{12} + \varphi_{23} + \varphi_{34} + \varphi_{14}}{4} \quad (4)$$

де L – довжина поздовжніх стрижнів; T_1, T_2 – початкова та кінцева температура нагріву ферми.

Отримані розрахункові значення середніх сумарних КЛТР та середніх сумарних кутових деформацій для 24-х етапів термоцикування представлені на графіках $\alpha_{cp} = f(t)$ (рис. 2) і $\varphi_{cp} = f(t)$ (рис. 3).

Апроксимація експериментальних даних дозволила отримати залежності КЛТР труб та кутових деформацій ферми від тривалості термоцикування у вигляді

$$\alpha_{cp} = 1 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(t) - 2 \cdot 10^{-7}, \quad (5)$$

$$\varphi_{cp} = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,81. \quad (6)$$

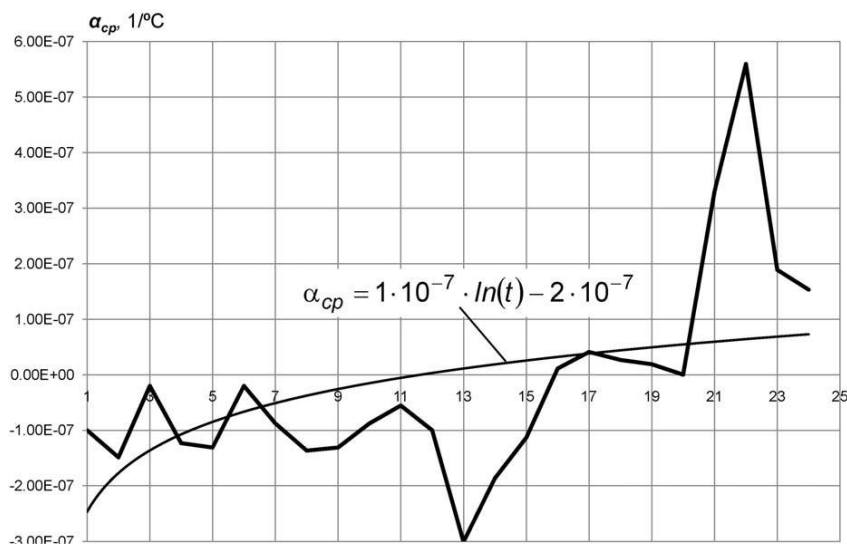


Рис. 2. Залежність КЛТР ферми від тривалості термоцикування

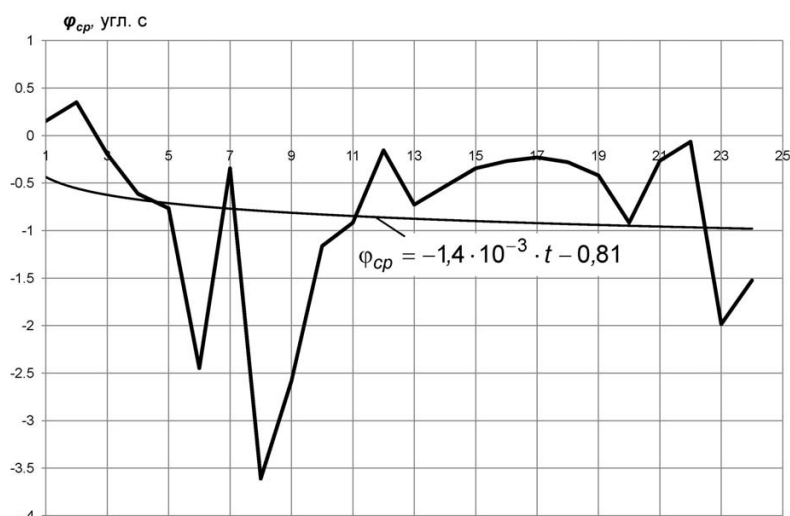


Рис. 3. Залежність кутових деформацій ферми від тривалості термоцикування

Аналіз залежності КЛТР труб ферми від тривалості термоцикування показує, що зі збільшенням кількості термоциклів зростає і абсолютна величина термічних деформацій,

тобто відбувається термостабілізація, причому, починаючи приблизно з 10...12 етапу термоциклювання, зміна закону термічного деформування стає незначною. Це вказує на необхідність введення в процес виготовлення елементів розміростабільних конструкцій такої технологічної операції, як попереднє термоциклювання. Кутові деформації ферми від тривалості термоцикліровання практично не залежать і залишаються постійними лише на рівні – 0,8 кут.сек протягом усього періоду термічного навантаження.

Істотна анізотропія пружних та теплофізичних характеристик односпрямованих КМ дозволяє створювати багатоспрямовані структури з прогнозованими у будь-якому напрямку властивостями. Це ілюструє широкі перспективи застосування КМ у розміростабільних конструкціях та можливості управління законом їхнього термічного деформування при накладенні обмежень на міцність та жорсткість.

Висновки

1. При використанні вуглепластику як конструкційного матеріалу можна знизити масу ферми в 1,7...2,8 рази в порівнянні з виготовленою з алюмінієвого сплаву.
2. Випробування на теплову деформацію показують, що лінійні та кутові деформації вуглепластикової ферми у 7 разів менші, ніж виготовленої з алюмінієвого сплаву АМгб.
3. Частка вуглепластику для більшості ферм становить 47...64%, що свідчить про наявність резервів подальшого вдосконалення ферм за масою та термостабільністю.
4. У ДНУ та ДКБ «Південне» спільно розроблено методику та випробувальне обладнання, що дозволяють з високою точністю визначати КЛТР вуглепластикових труб (точність визначення - $1 \cdot 10^{-8} 1/^{\circ}\text{C}$). Методика заснована на голографічній інтерферометрії та на порядок точніше традиційних, що використовують як вимірювальний засіб мікроскоп.
5. Розроблено оптимальну схему армування трубчастих елементів, що дозволяє на порядок знизити їх КЛТР і довести його до рівня кращих марок інварних сплавів.
6. Для визначення ступеня деформації вуглепластикових ферменних конструкцій з плином часу при впливі граничних температур виготовлено модельну ферму та проведені її ресурсні випробування, на яких вона зазнавала впливу 15 циклів теплового навантаження за схемою $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 65^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$, у результаті яких отримані залежності КЛТР труб та кутових деформацій ферми від тривалості термоциклювання.
7. Встановлено, що зі збільшенням кількості термоциклів відбувається термостабілізація. Це показує необхідність введення у процес виготовлення елементів розміростабільних конструкцій попереднього термоциклювання.
8. Показано, що кутові деформації ферми практично не залежать від тривалості термоциклювання та залишаються постійними протягом усього періоду термічного навантаження.

ТОЧНІСТЬ ОБЧИСЛЮВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ЕФЕКТУ НА КОЛИВАЛЬНОМУ ЕТАПІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Електрогідрравлічний ефект (ЕГЕ) є специфічним імпульсним перетворенням в рідині енергії електричного струму в тиск, подібним до блискавки в газовому середовищі та основою багатьох технологій обробки матеріалів [1]. До складу технологічної системи входять елементи, що мають різний агрегатний стан: паро-газова порожнина (ППП), що розширюється з-за імпульсного нагріву електричним струмом; технологічна рідина, яка рухається під дією PPP та передає тиск на тверді технологічні об'єкт та оснащення. Динаміка таких систем вивчається в напрямку прикладної механіки FSI (Fluid-Structure Intraction), одним із методів якого є комп'ютерне моделювання на основі розв'язання задач механіки суцільних середовищ.

При формулюванні математичних задач FSI рух плинних (рідких і газоподібних) середовищ описується в ейлерових, а твердих тіл - у лагранжевих системах відліку. Для вирішення задач FSI потрібно об'єднати описи плинних і твердих середовищ у рамках однієї обчислювальної схеми, що повинна допускати також опис контактної взаємодії. Загальна математична модель ЕГЕ [2] є суттєво нелінійною і тому не має аналітичного розв'язку у вигляді обчислювальних функцій. Для рішення рівнянь моделі ЕГЕ використовується чисельний метод ALE-FE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian-Finite Elements) або просто ALE [3].

Використання методу ALE пов'язано з виникненням похибок дискретизації, інтерполяції, використання багато-матеріальних скінченних елементів, рішення систем алгебраїчних рівнянь, яким властиве накопичення під час обчислювального процесу. Теоретичні дослідження методу ALE проводяться абстрактно у напрямках точності апроксимації, обчислювальної стійкості та збіжності рішення [3, 4, 5]. Але аналіз накопичення похибки чисельного рішення залежить від специфічних умов рішення конкретних задач і потребує порівняння чисельного та точного рішення, яке в даному випадку неможливе. Для аналізу точності з урахуванням накопичення помилок можуть використовуватися також спеціальні тестові задачі [6], які дозволяють проводити кількісну перевірку та порівняння різних чисельних методів та програмних засобів, але для моделювання ЕГЕ відсутні такі задачі.

Математична модель ЕГЕ відноситься до типу гіперболічних, які мають три типи рішення-хвильовий, коливальний та стаціонарний. Для кожного типу рішення існують загальні параметри або співвідношення, які мають відомі значення з загально-механічних досліджень, наприклад – спектр власних коливань на етапі коливань, або закон збереження внутрішньої енергії на стаціонарному етапі. Ці ж параметри (або співвідношення) можуть бути обчислені з використанням отриманого чисельного рішення. Аналіз значень загальних параметрів (співвідношень), отриманих різними методами, дає можливість визначити накопичену похибку чисельного рішення.

В роботі [2] розглянуто аналіз точності обчислювання моделі ЕГЕ на заключному стаціонарному етапі. Показано, що внутрішня енергія, як інтеграл за об'ємом від густини роботи напруг на переміщеннях, дорівнює інтегралу за часом від потужності термодинамічного збурення на етапі активного збурення та зберігається на протязі стаціонарного етапу. Інакше кажучи, чисельне рішення точне в енергетичній нормі.

В даній доповіді розглянуто точність чисельного рішення математичної моделі ЕГЕ з точки зору відтворення вільних коливань.

Використана математична модель ЕГЕ та механічна система, які детально описані в [2]. Аналізуються значення параметрів НДС елементів системи пізніше закінчення збудження,

коли залежність параметрів за часом має характер вільних коливань з достатньою для аналізу амплітудою, причому достатньо однорідних за простором. Частоти коливань різних параметрів (тиску, об'єму) визначаються за допомогою методу FFT (швидкого перетворення Фур'є) [7].

На рис. 1,а показано залежність об'єму ПГП від часу. Та ж залежність, але в іншому масштабі показана на рис.1, б (1). Об'єм змінюється від початкового значення $1,875 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ до кінцевого асимптотичного значення $2,067 \times 10^{-5} \text{ м}^3$, тобто в 1120 разів, це величина об'ємної деформації ПГП. Можливість розрахунків за таким ступенем об'ємної деформації забезпечена використанням саме методу MCE-ALE. Об'єм ПГП коливається, амплітуда коливань з часом вщухає до нуля, тобто коливання асимптотично згасають. На рис.1, б показано залежності об'ємів ПГП (1), рідини (2) та їхньої суми (3) або об'єму камери. Об'єм рідини змінюється від початкового значення $1,693 \times 10^{-4} \text{ м}^3$ до кінцевого асимптотичного значення $1487 \times 10^{-4} \text{ м}^3$, тобто об'ємна деформація сягає величини 0,12. Об'єм рідини, як і об'єм ПГП, відзначається осциляцією з тим же періодом та амплітудою, але в протифазі, завдяки чому їх сума (рис.1, б (3)) має постійне значення, що відповідає об'єму жорсткої камери $1,693 \times 10^{-4} \text{ м}^3$. Загальний об'єм обчислюється як сума об'ємів рідини та ПГП, постійність загального об'єму є виразом точності обчислення моделі ЕГЕ.

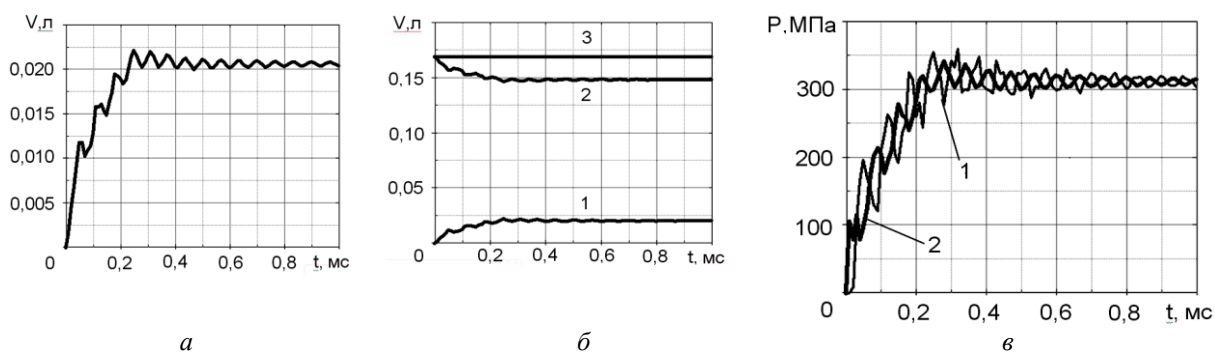


Рис. 1. Залежності об'ємів ПГП, рідини та тиску від часу

На рис.2,а показано залежності тиску від часу в двох різних скінченних елементах, розташованих на осі в ПГП та в двох різних елементах, що знаходяться в рідині (синя та зелена лінії). На рис.2, б показано ті ж залежності, але в іншому масштабі на інтервалі часу (0,6÷0,8) мс, на якому аналізується спектр коливань. На рис.2,в показано спектр коливань залежностей, обчислений за методом FFT.

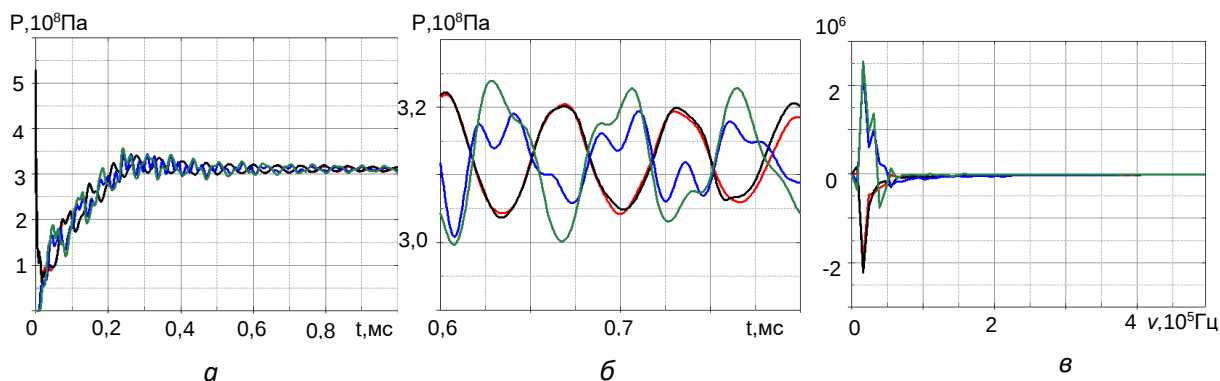


Рис. 2. Залежності тиску від часу (а,б) та спектр коливань (в)

Видно, що залежності мають форму ангармонійних згасаючих коливань. Спектр дуже стислий, значущими є 3-4 частоти. Основні частоти коливань ПГП та рідини однакові та дорівнюють $1,57 \times 10^4 \text{ Гц}$, причому коливання на цій частоті протифазні. Період коливань на основній частоті дорівнює $6,37 \times 10^{-5} \text{ с}$.

Аналіз коливань об'єму (рис.1,а) та внутрішньої енергії рідини та ПГП за таким способом дає такі самі результати: основні частоти однакові и дорівнюють 1.57×10^4 Гц, причому коливання на цій частоті протифазні.

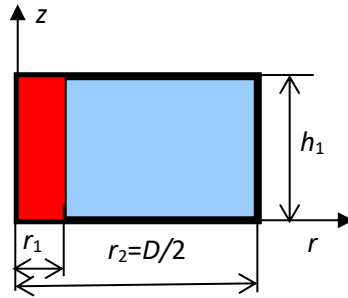


Рис.3. 2-d модель

Ми бачимо, що власні коливання різних механічних параметрів, що визначають механічний стан системи ЕГЕ в різних окремих точках (тиск) та загалом (внутрішня енергія та об'єм), мають одну й ту ж власну частоту 1.57×10^4 Гц. Усі ці параметри залежать від поля переміщень, тому єдиність значення частоти є вказівкою на те, що й частота коливань поля переміщень повинна бути тою же самою. Як було вказано вище, в даному випадку немає можливості вирішити задачу визначення спектру коливань.

Розглянемо близьку за умовами осесиметричну спрощену механічну систему для пошуку спектру частот власних коливань (рис. 3). Вона включає ПГП (червоний колір) та рідину (блакитний колір) в жорсткій камері циліндричної форми висотою h_1 та зовнішнім радіусом, що дорівнює найбільшому радіусу. Об'єм, кількість речовини, тиск та модулі об'ємного стискування системи такі ж, як в 3-d моделі в асимптотичному стані, отримані в чисельному рішенні. Речовина ПГП та рідина деформуються за пружним законом.

Визначимо модуль об'ємного стискування речовини ПГП. Для цього про диференціюємо рівняння адіабати $PV_1^\gamma = \text{const}$ після закінчення нагріву та отримаємо

$$dPV_1^\gamma + P\gamma V_1^{\gamma-1}dV_1 = 0, \quad (1)$$

де $P = 3,124 \times 10^8$ Па – асимптотичний тиск, отриманий в рішенні для 3-d моделі, $V_1 = 2,067 \times 10^{-5}$ м³ – об'єм ПГП, отриманий в рішенні для 3-d моделі, $\gamma = 1,26$ – постійна адіабати. Перетворимо (1)

$$dP = -P\gamma V_1^{-1}dV_1 = -\gamma \frac{P}{V_1}dV_1 = -K_1 dV_1, \quad (2)$$

де $K_1 = \gamma P/V_1 = 1,903 \times 10^{13}$ кг/с² м⁴ – модуль об'ємного стискування речовини ПГП.

Визначимо актуальну густину матеріалів в асимптотичному стані.

$$\rho_1 = \rho_{10} \frac{V_{10}}{V_1} = 0,908, \rho_2 = \rho_{20} \frac{V_{20}}{V_2} = 1.1385 \times 10^3, \quad (3)$$

де $\rho_{10} = \rho_{20} = 1000$ кг/м³ – початкова густина речовини ПГП та рідини, відповідно.

Запишемо умови рівності об'ємів та розмірів 3-d та 2-d моделей

$$\begin{aligned} V_1 &= \pi r_1^2 z = 2.065 \times 10^{-5}, \\ V_2 &= \pi (r_2^2 - r_1^2) z = 1.487 \times 10^{-4}, \\ r_2 &= 3.35 \times 10^{-2}, \end{aligned} \quad (4)$$

де V_1, V_2 – об'єми ПГП та рідини в асимптотичному стані системи, r_1, r_2 – радіуси межі розділу ПГП та рідини, h_1 – висота шару в осьовому напрямку. Рішення щодо h_1 та r_1

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{V_1 + V_2}{\pi r_2^2} = 4.8033 \times 10^{-2} \text{ м}, \\ r_1 &= \sqrt{\frac{V_1}{\pi z}} = \sqrt{\frac{2.065 \times 10^{-5}}{\pi \times 4.8033 \times 10^{-2}}} = 1.1698 \times 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned} \quad (5)$$

З урахуванням отриманих геометричних розмірів та параметрів сформульована задача на розрахунок механічного стану та визначення власних частот 2-d моделі. За методом Ланцоша [8] отримано перші п'ять періодів власних коливань

$$\begin{aligned} T_1 &= 5.86 \times 10^{-5}, T_2 = 3.348 \times 10^{-5}, T_3 = 3.067 \times 10^{-5}, \\ T_4 &= 2.99 \times 10^{-5}, T_5 = 2.76 \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (6)$$

Різниця між періодом коливань, визначеним спектральним аналізом та першою частотою власних коливань 2-d моделі дорівнює $0,51 \times 10^{-5}$ с або 8%.

Висновки

Різні параметри руху, які чисельно обчислені під час рішення рівнянь моделі ЕГЕ, мають однакову основну частоту вільних коливань, яка є узагальненим для всієї системи параметром. Ці параметри (тиск, об'єм, енергії) є результатом перерахування швидкостей переміщень за різними алгоритмами, що визначаються безпосередньо. Однаковість власних частот різних параметрів означає однорідність то точність визначення обчислення загальної основи, тобто – рішення рівнянь моделі ЕГЕ.

Порівняння частот рішень 2-d та 3-d моделей ЕГЕ дає оцінку точності 8%.

Список використаних джерел

1. Zhang F., Wei Y., He K., Hang Z. Experimental investigation on electro-hydraulic forming with flexible-die, 18th International Conference Metal Forming 2020, ScienceDirect Procedia Manufacturing 50 (2020).– pp. 324–327.
2. Нарижний О. Г., Тараненко М.С., Богачьова Т.Б. Методика та дослідження точності розрахунку математичної моделі електрогідрравлічного ефекту. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : збірник наукових праць. – Х. : Нац аерокосм. ун-т «ХАІ». Вип.. 100, 2024.с. 35-57. DOI: 10.32620/oikit.2024.100.03. ISSN 2663-2411
3. Arbitrary Lagrangian Eulerian and Fluid– structure Interaction. Numerical Simulation. Edited by M. Souli, D. J. Benson. Wiley, 2010.–294 p.
4. Busto S., Dumbser M., Rio-Martin, L. An Arbitrary-Lagrangian-Eulerian hybrid finite volume/finite element method on moving unstructured meshes for the Navier-Stokes equations, arXiv:2301.09601v1 [math.NA] 23 Jan 2023. -36 p.
5. Koutsogiannakis P., Papathanasiou T.K. Dal Corso F. A simple yet effective ALE-FE method for the nonlinear planar dynamics of variable-length flexible rods. arXiv:2410.22545v1 [cond-mat.soft] 29 Oct 2024.– pp.1-25.

6. Turek S., Hron J., Razzaq M., Wobker H., Schäfer M. Numerical Benchmarking of Fluid-Structure Interaction: A comparison of different discretization and solution approaches. In book: Fluid structure interaction II September 2010. Lecture notes in computational sciences and engineering 73:413-424.–pp. 1-12. DOI: 10.1007/978-3-642-14206-2_15

7. Brigham, E. O. The fast Fourier transform and its applications Prentice-Hall, 1988.– 488 p.

8. Lanczos, C. (1950). An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators . Journal of Research of the National Bureau of Standards. 45 (4): pp. 255–282. doi:10.6028/jres.045.026

Омельченко О.В., аспірант
kartzpua@gmail.com
Воденніков С.А., д.т.н., професор
s_vodennikov@i.ua
Широкобокова Н.В., к.т.н., доцентка
natabokova12@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ВІДЦЕНТРОВОМУ ЛИТТІ

Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

В сучасному машинобудуванні 3D-технології використовуються для створення концептуальних моделей, візуалізації об'єктів, моделей машин, різноманітних механізмів та деталей. В дослідженнях науковців та різноманітних публікаціях пропонується застосування поширених технологій 3D-друку: метод FFF/FDM, метод SLA, метод SLS, метод CJP та інші. Також показуються можливості застосування даного методу, наприклад, в проєктуванні деталей, компонентів в автомобільній галузі, порівнюються зразки з різними параметрами друку (якість поверхні, геометрія) [1]. При цьому чітко спостерігається тенденція, що використання 3D-друку на етапі розробки або в технологічному процесі дозволяє створювати більш дешеві вироби з високою якістю при меншому використанні часу [2].

В той же час принципи технології адитивного виробництва та його розвитку можна розглядати в напрямку застосування в галузі лиття, включаючи тривимірний друк, селективне лазерне спікання, стереолітографію, шарувате екструзійне формування, тощо. Також приділяється увага питанню стану даного напрямку в різних країнах та його майбутнього розвитку [3]. Дані, наведені в наступній статті чітко показують, що виготовлення сучасними методами не тільки виробів, але й прес-форм, штампів, шаблонів та інших інструментів є досить важливою частиною розвитку будь якої галузі. Як зазначається, раніше Volkswagen на створення однієї прес-форми витрачав до 8 тижнів і біля 50 тис. доларів. Зараз концерн друкує 93% оснастки для свого заводу у Вольфсбурзі за 3-5 днів, використовуючи матеріали на кшталт РЕВА (полієфірблокамід). Ці деталі витримують температуру до 200°C і скорочують витрати на 70% [4].

Швидке прототипування та виробництво малих серій складних виробів є одними з ключових завдань сучасного машинобудування. В той же час виготовлення виробів для різних напрямків машинобудування традиційними методами лиття найчастіше пов'язано з тривалим циклом виробництва та витратами на оснастку. Адитивні технології, зокрема 3D-друк, надають унікальної можливості створювати ливарні форми безпосередньо з цифрової моделі, що значно прискорює процес і дозволяє реалізувати складні внутрішні та зовнішні геометрії, які були б неможливими або надзвичайно дорогими при використанні традиційних методів.

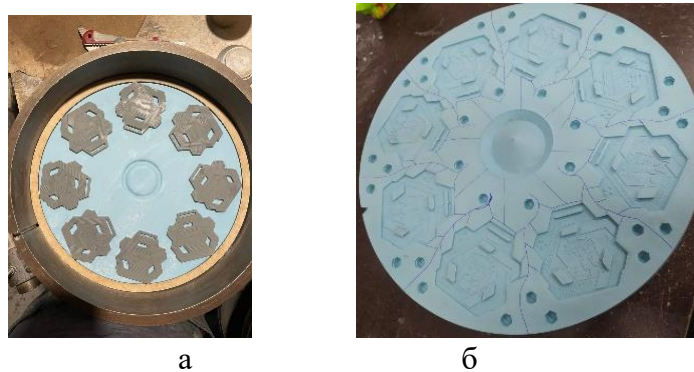
Застосування 3D-друкованих ливарних форм може вирішити низку наукових та практичних проблем у машинобудуванні:

- розробка нових матеріалів для 3D-друку форм з оптимальними термічними властивостями, газопроникністю, міцністю та здатністю до легкого видалення після лиття;
- оптимізація параметрів та вивчення їх впливу (товщина шару, швидкість друку та інші) на якість поверхні форми, її міцність та точність геометрії;
- моделювання процесів лиття та дослідження взаємодії металу з друкованою формою (наприклад, утворення дефектів на поверхні виливка та розробка методів їх запобігання);
- прискорене прототипування та виробництво унікальних деталей (для невеликих партій, де 3D-друк стає економічно вигідною альтернативою);
- зниження витрат на оснастку.

До основних параметрів 3D-друку, що вплинуть на якість майстер-моделей можна віднести: висота шару (вплине на рівень деталізації та гладкість поверхні майстер-моделі); швидкість друку (вплине на точність); щільність друку (вплине на жорсткість та довговічність

виробу); температурні режими та вибір матеріалу (вплинуть на міцність зчеплення шарів та усієї моделі).

В наших дослідженнях було приділено увагу одному з ключових факторів для забезпечення високої якості полімерних моделей, що використовуються при відцентровому литті - висоті шару 3D-друку. Відцентрова сила сприяє рівномірному розподілу розплавленого металу в формі. В результаті підвищується точність, зменшується кількість дефектів, покращуються механічні властивості кінцевих виливків. Як показали результати експериментів, зменшення товщини шару до 50 мкм забезпечує високу точність і якість поверхні моделі, що критично важливо при відцентровому литті, де навіть незначні дефекти можуть впливати на якість виливка. При меншій висоті шару кожен наступний шар стає тоншим і, відповідно, перехід між шарами менш помітний, але при цьому збільшується час друку. Приклад отриманої майстер-моделі наведено на рисунку 1. Наступний фактор – щільність заповнення моделі. В якості оптимальних значень слід використовувати щільність заповнення в межах 20–50% (при відцентровому литті), що дозволить створити цілісну та міцну модель та уникнути деформації під час формування виливка.



а – полімерні моделі, створені методом 3D –друку,
б – готова форма для відцентрового лиття

Рис. 1. Застосування 3D-друку для отримання майстер-моделей.

Застосування 3D-друкованих ливарних форм – це перспективний напрямок в машинобудуванні для створення складних, легких та функціональних інструментів, а сам процес друку є досить складним і таким, що залежить від багатьох параметрів. Тому в подальших дослідженнях планується визначити вплив орієнтації друку та застосування різних типів полімерів. Правильно підібрана орієнтація підвищить як якість поверхні самої моделі, так і готового виробу. В той же час дослідження термічних характеристик матеріалів дозволить уникнути утворення дефектів у формі та покращити якість виливка.

Список використаних джерел

1. Caban J. Szala M., Kęsik J., Czuba Ł. Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, R. 18. 2017. № 6. P. 573-579
2. <https://pro3d.com.ua/a382998-printeri-mashinobuduvanni.html>
3. https://www.researchgate.net/publication/360562834_Additive_Manufacturing_Technology_and_Its_Application_to_Casting
4. <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk-v-avtomobilebuduvanni/>

МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ПЛАСТИКОВОЇ ПЛЯШКИ НА ПАДІННЯ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS SIMULATION

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Однією з важливих вимог до виготовленої пластикової пляшки є лише успішні випробування на ударну міцність при її вільному падінні з певної висоти. В іншому випадку необхідно перевірити параметри процесу її виготовлення та усунути причини, що призводять до негативного результату випробувань. Наприклад, згідно з вимогами стандарту ISBT (Міжнародне співтовариство технологів безалкогольних напоїв), пляшки діаметром до 160 мм можуть скидатися з висоти від 500 до 2000 мм.

У галузі виробництва пластикової тари (пляшок) випробування на падіння проводять на спеціальному устаткуванні — випробувальних приладах (тестерах). З іншого боку, отримати оцінку таких випробувань можна за допомогою комп'ютерного моделювання процесу падіння пластикової пляшки. Результати такого моделювання можуть бути враховані під час розробки протоколу випробувань на випробувальному приладі.

Програма SolidWorks Simulation забезпечує рішення щодо моделювання випробувань на ударне навантаження (Drop test Study). За допомогою цього дослідження можна оцінити вплив падіння моделі на тверду підлогу на її напружено-деформований стан (НДС). SolidWorks Simulation розв'язує динамічну задачу, отримуючи відповідь як функції часу. На рис. 1 показано схему проведення випробувань на ударне навантаження моделі.

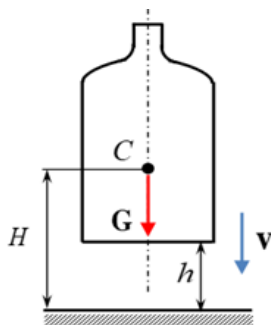


Рис. 1. Схема випробувань на ударне навантаження моделі пляшки

Налаштування випробування на ударне навантаження дозволяє використовувати наступні параметри: висоту падіння H (відстань між центроїдом тіла – точка C , та плоскою жорсткою підлогою у напрямку сили тяжіння G або h (є найменшою відстанню між тілом та жорсткою плоскою підлогою); значення швидкості G на момент удару; величину и направление действия силы тяжіння G ; орієнтація площини удара; коефіцієнт тертя між моделлю та площиною удара. Замість твердої поверхні можна задавати гнучку плоску поверхню.

Тіло (модель) переміщається у напрямку сили тяжіння у вигляді твердого тіла доти, доки не вдаряється об жорстку площину. Програма обчислює швидкість при ударі формулою $v = \sqrt{2Hg}$, де g – прискорення вільного падіння, а H (або h) – висота падіння.

Обертання моделі не враховуються доти, доки не відбувається початковий удар.

Область удара програма визначає на підставі напрямку швидкості удару.

Основне рівняння руху, що розв'язується, має вигляд

$$\mathbf{F}_I(t) + \mathbf{F}_D(t) + \mathbf{F}_E(t) = \mathbf{R}(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{F}_I(t)$ – сили інерції, $\mathbf{F}_D(t)$ – сили демпфування, $\mathbf{F}_E(t)$ – сили пружності.

Зовнішні сили $\mathbf{R}(t)$ включають гравітаційні сили та сили ударного навантаження. Для чисельного розв'язування рівняння (1) використовується явний метод інтегрування за часом.

Моделювання випробувань конструкції пластикової пляшки на падіння було проведено для 3D геометричної моделі ПЕТ (поліетилентерефталат) пляшки масою 1,5 кг. Найбільший діаметр форми пляшки становив 340 мм, а висота – 450 мм. Місткість пляшки 10,5 літрів. Основні механічні характеристики матеріалу пляшки такі (база даних матеріалів Plastics програми SolidWorks): модуль пружності $E=2960$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu=0,37$; щільність матеріалу $\rho=1420$ кг/м³; допустима напруга розтягування $[\sigma_p]=57,3$ МПа; допустима напруга стиснення $[\sigma_{cm}]=92,9$ МПа. Висота падіння H дорівнювала 1 м. Площина зіткнення розташована перпендикулярно силі гравітації (див рис. 1).

На рис. 2 показані геометрична модель пляшки з кришкою (рис. 2, а) та її скінченно-елементна модель. Скінченно-елементна сітка побудована твердотільними тетраедральними скінченними елементами (Solid Elements). Загальна кількість скінченних елементів становила 35761, а кількість вузлів – 8693.

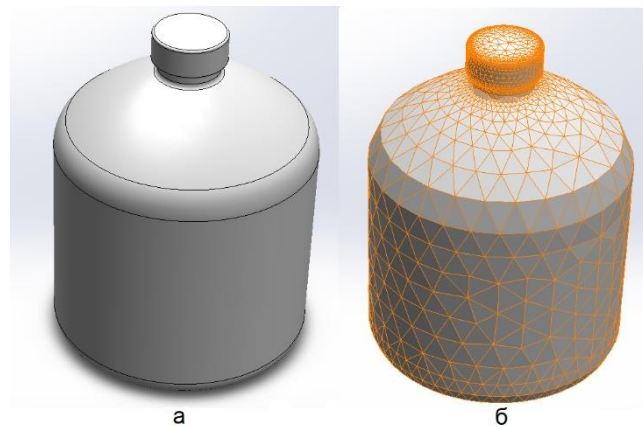


Рис. 2. Схема випробувань на ударне навантаження моделі

Результати моделювання для епюр напруги Мізеса, перемішень (результуючих) та еквівалентних деформацій показано на рис. 3. На цьому рисунку також показано зону пляшки, де діють найбільші значення напруги по Мізеса.

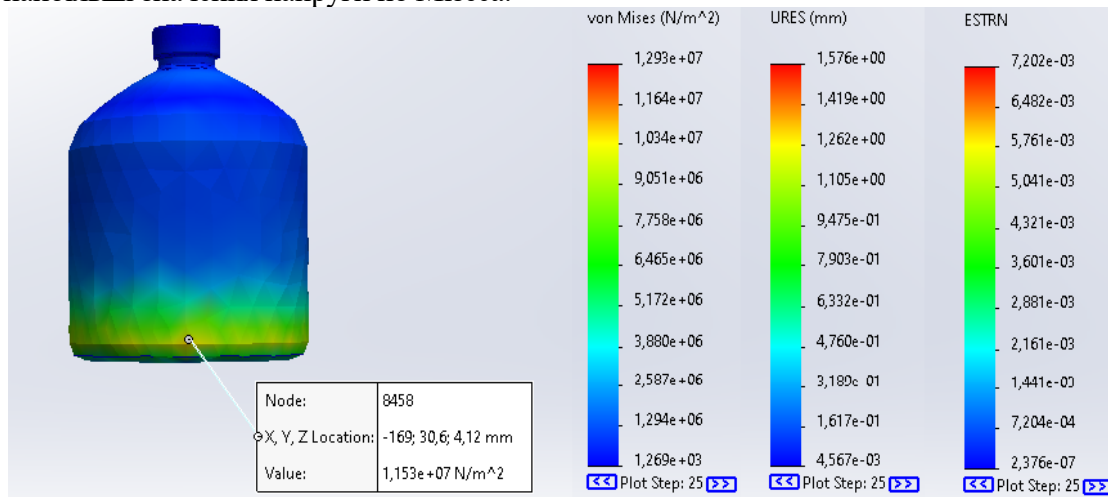


Рис. 3. Епюри напруги Мізеса, перемішень та еквівалентних деформацій

Найбільші значення напруги Мізеса знайдені в трьох вузлах: 8661 (12, 93 МПа); 42(12, 92 МПа); 8128 (12,61 МПа). Результируючі переміщення вузлів сітки змінюються в діапазоні від 1.5 мм (вузол 8291) до 1,576 мм (вузол 2743). Найбільше значення еквівалентної деформації $7,2 \cdot 10^{-3}$ набуто для вузла 6791.

Тривалість часу зіткнення склала 392,7 мкс. Найбільше значення контактної сили у напрямку швидкості падіння (вісь Y) становило $N_{\max} = 6,33$ кН. Закон зміни амплітуди контактної сили показано на рис. 4.

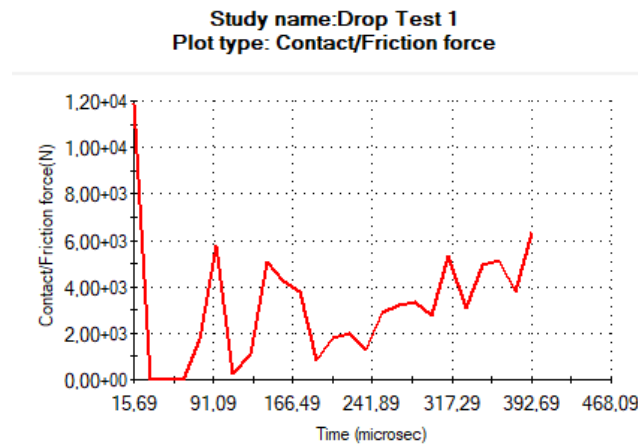


Рис. 4. Графік закону зміни амплітуди контактної сили

Закон зміни амплітуди напруги Мізеса для вузла 8661 показано на рис. 5.

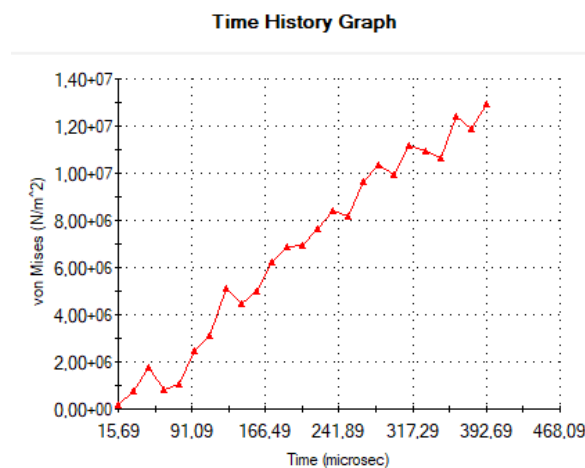


Рис. 5. Графік закону зміни амплітуди напруги Мізеса для вузла 8661

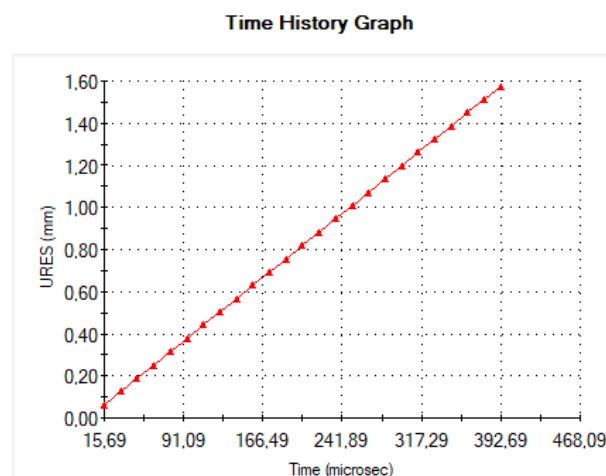


Рис. 6. Графік закону зміни амплітуди результируючого переміщення для вузла 2743

Закон зміни амплітуди п поступальної швидкості вузла 8661оказано на рис. 7.

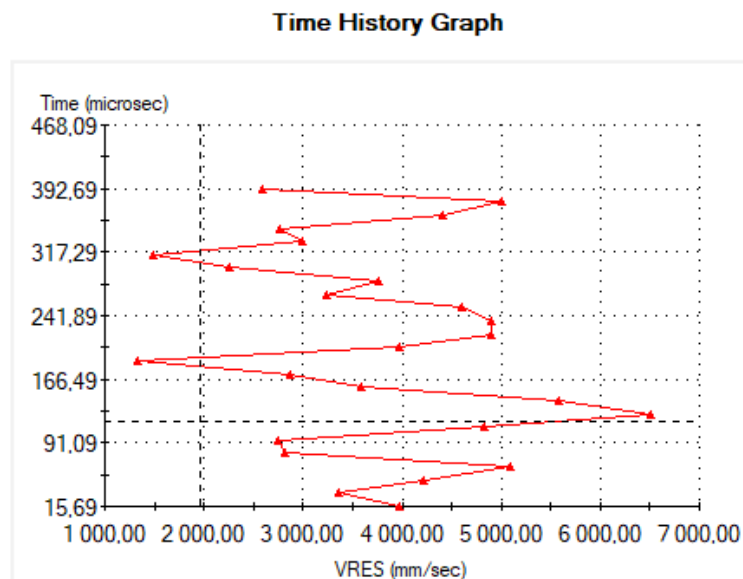


Рис. 7. Графік закону зміни амплітуди поступальної швидкості вузла 8661

Закон зміни амплітуди п поступального прискорення вузла 8661оказано на рис. 8.

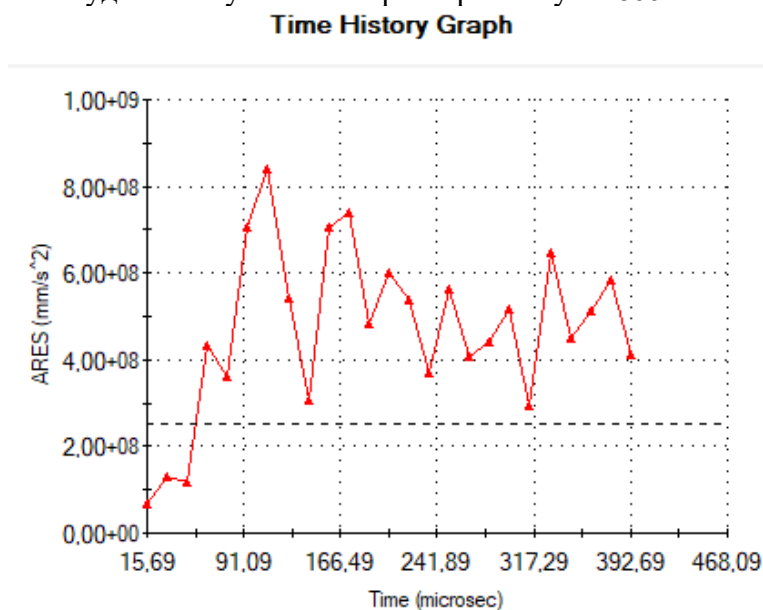


Рис. 8. Графік закону зміни амплітуди поступального прискорення вузла 8661

Аналіз результатів моделювання показав наступне: одержані характеристики НДС не перевищили задані допустимі значення; не виявлено наявності залишкових напруг та/або деформацій; область суттєвих значень напруг та деформацій розташовано у нижній частині моделі пляшки; поле напруг не є симетричним щодо вертикальної осі моделі пляшки, також це стосується і трьох вузлів сітки, в яких отримані найбільші значення напруг Мізеса.

Геометрія 3D моделі пляшки істотно впливає на час моделювання, який в свою чергу визначається побудованою сіткою скінчених елементів.

Проведене моделювання випробувань на ударне навантаження пластикової пляшки у середовищі програми SolidWorks Simulation підтвердило ефективність отримання даних про НДС пляшки, з одного боку, а з іншого – показало, які питання (моменти) необхідно уточнити. Зокрема, треба сформулювати критерій стійкості до падіння та які параметри матеріалу пляшки треба задавати.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СІТЧАСТИХ КОНСТРУКЦІЙ З КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

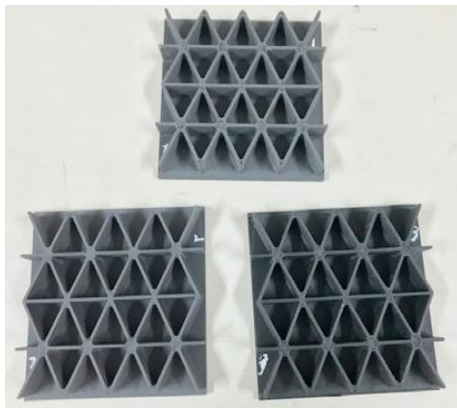
Сітчасті конструкції з композиційних матеріалів становлять один із перспективних напрямів сучасного інженерного проєктування в галузі авіаційної та ракетно-космічної техніки. Сітчасті конструкції в загальному вигляді представляють собою перехресну систему силових елементів – ребер жорсткості, які утворюють регулярну геометричну сітку. На тлі інших типів композитних конструкцій, таких як сендвіч-панелі (з двома обшивками та стільниковим заповнювачем) та панелі з підкріплюючими елементами (обшивки зі стрингерами чи шпангоутами), де ані обшивка, ані ребра не мають односпрямовану структуру, в сітчастих конструкціях навантаження сприймають ребра, які виготовлені з односпрямованого композитного матеріалу, що забезпечують здатність сітчастих конструкцій до рівномірного розподілення навантаження в площині та ефективно чинити опір локальним пошкодженням. Завдяки інтегральній природі армування, вони мають підвищену стійкість до втоми та зменшений ризик розшарування. У поєднанні з анізотропними властивостями сучасних композиційних матеріалів, такі структури забезпечують надзвичайно високу питому жорсткість, міцність та стійкість при одночасному зниженні ваги. Саме тому сітчасті конструкції є одним з ключових напрямів у розвитку інженерних систем для авіаційної, космічної, транспортної та оборонної техніки [1,3].

Оскільки сітчасті конструкції характеризуються складною геометрією, а композитні матеріали — анізотропією, процес їх проєктування та розрахунку потребує використання спеціалізованих чисельних методів і програмних інструментів [2, 3, 5]. Ці методи мають враховувати не лише геометричну взаємодію ребер і оболонки, але й механічну поведінку армованої матриці, з урахуванням потенційних дефектів виготовлення, температурних і ударних навантажень. Незважаючи на складність виготовлення та необхідність точного чисельного аналізу, сітчастих конструкцій з композитних матеріалів завдяки своїм характеристикам є незамінними в критичних застосуваннях, де вага, надійність і ефективність відіграють визначальну роль.

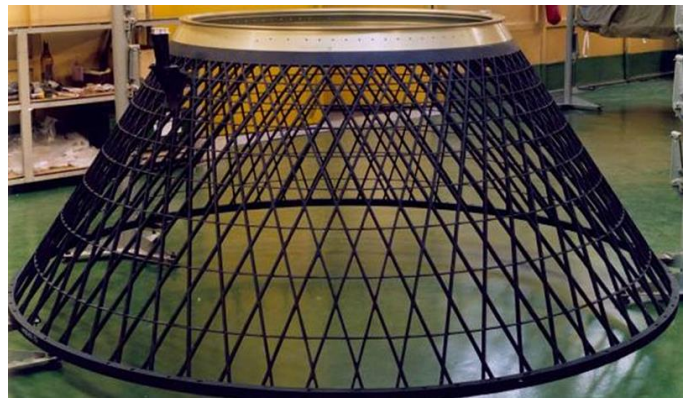
Метою роботи є широкий огляд сучасних методів проєктування та чисельного розрахунку сітчастих конструкцій з композиційних матеріалів, включно з прикладами оптимізації геометрії, моделюванням міцності, стійкості та особливостей виготовлення таких систем.

Сітчасті конструкції можуть мати дві основні структурні конфігурації: оболонкові та каркасні. Оболонкові або оболонково-реберні сітчасті конструкції — це тонкостінні оболонки (циліндричної, конічної або сферичної форми), підсилені перехресною системою ребер жорсткості, що зображено на рис. 1а. У таких системах оболонка працює на передачу навантаження у поєднанні з ребрами, які сприймають основну частину згинальних моментів і осьових зусиль. Це дозволяє досягти оптимального балансу між масою і жорсткістю та моделювати конструкцію за спрощеною оболонковою схемою.

Каркасні (або суто сітчасті) конструкції рис. 1б — складаються виключно з перехресно орієнтованих силових елементів (ребер жорсткості), без наявності оболонки як несучого елемента. У таких конструкціях вся несуча здатність забезпечена системою ребер, виготовлених з високоміцного односпрямованого композиту. Вони дозволяють створювати відкриті чи напіввідкриті конфігурації, мають низьку питому масу, добре адаптовані для інтеграції в броньовані платформи, а також системи, де важливо забезпечити швидке тепловідведення або мінімізувати вітрове навантаження.



а



б

Рис 1. Види сітчастих конструкцій з композитних матеріалів, а – ізогрідна підкріплена панель з поперечним набором ребер, б – сітчаста конічна оболонка адаптера ракетного носія з геодезичною траєкторією спіральних ребер

Обидві конфігурації мають свої переваги й вибираються залежно від функціонального призначення виробу, умов навантаження, технологічних обмежень та цільових характеристик таких як жорсткість, стійкість, втомна міцність, тощо.

Розрахунок сітчастих конструкцій базується на двох основних типах моделей — дискретних та континуальних.

Континуальні моделі трактують сітчасту структуру як умовну однорідну анізотропну оболонку, механічні властивості якої (модулі пружності, коефіцієнти Пуассона, зсуву тощо) визначаються на основі параметрів елементів: геометрії, товщини, кута орієнтації ребер та характеристик композитного матеріалу. Такий підхід дозволяє виконувати параметричні дослідження та оптимізацію конструкцій ще на етапі концептуального проєктування. Основні переваги — обчислювальна ефективність та можливість аналітичного аналізу загальних закономірностей поведінки конструкції.

Дискретні моделі, навпаки, враховують геометрію та матеріальні властивості кожного окремого ребра. Вони будуються як система стрижневих або балкових елементів, з'єднаних відповідно до топології структури. Найчастіше реалізуються методом скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє точно враховувати локальні ефекти: концентрацію напружень у місцях з'єднання, вирізи, локальні підсилення. Дискретні моделі слугують основою для перевірочних розрахунків на пізніх етапах розробки.

У практиці проєктування обидва підходи поєднуються: континуальні моделі — для глобального аналізу та вибору оптимальних параметрів, дискретні — для верифікації з урахуванням реальної геометрії та умов експлуатації.

Розрахунки реалізуються у середовищах скінченно-елементного аналізу, таких як ANSYS, NASTRAN, Abaqus або COSMOS/M, які мають доступні спеціалізовані бібліотеки для моделювання композитів, нелінійної геометрії, втрати стійкості та втомного навантаження.

Аналіз тонкостінних анізотропних оболонок, зокрема сітчастих конструкцій, ґрунтується на загальних рівняннях теорії оболонок, модифікованих з урахуванням анізотропних властивостей матеріалу. Конструктивні особливості сітчастих оболонок проявляються тільки у співвідношеннях пружності, які мають наступний вид [4]:

$$N_x = B_{11} \cdot \varepsilon_x + B_{12} \cdot \varepsilon_y; N_y = B_{21} \cdot \varepsilon_x + B_{22} \cdot \varepsilon_y; N_{xy} = B_{33} \cdot \varepsilon_{xy}. \quad (1)$$

$$M_x = D_{11} \cdot k_x + D_{12} \cdot k_y; M_y = D_{21} \cdot k_x + D_{22} \cdot k_y; M_{xy} = D_{33} \cdot k_{xy} \quad (2)$$

де x та y відповідають медіальній та кільцевій координаті оболонки обертання;
 N та M – це сила та момент у відповідних напрямках;
 ε та k – це компоненти мембранних деформацій та зміни кривизни оболонки;
 B та D – це мембранні та згинальні коефіцієнти жорсткості.

Загальний вид елемента сітчастої структури з як повздовжнім та поперечним набором ребер жорсткості так і з діагональними ребрами зображено на рис 2.

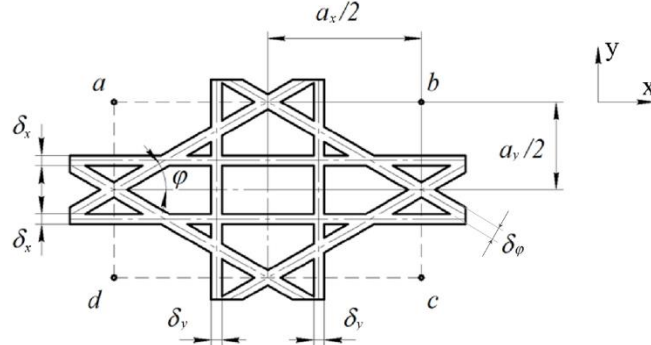


Рис 2. Параметри сітчастої структури з повздовжніми, поперечним та спіральними ребрами.

У випадку сітчастої системи яка складається з поздовжніх та кільцевих ребер прямокутного перерізу, як показано на рис 2, що мають висоту h та товщину δ , згинальні та мембранні коефіцієнти жорсткості мають наступну залежність:

$$D_{mn} = \frac{h^2}{12} \cdot B_{mn} \quad (3)$$

В свою чергу, коефіцієнт мембраною жорсткості B залежить від кута нахилу спіральних ребер φ , відстані між ребрами a та модулю пружності ребер E :

$$B_{11} = B_{\varphi} \cdot \cos^2(\varphi) + B_x; \quad B_{22} = B_{\varphi} \cdot \sin^2(\varphi) + B_y \quad (4)$$

$$B_{12} = B_{21} = B_{33} = B_{\varphi} \cdot \sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\varphi) \quad (5)$$

$$B_{\varphi} = E_{\varphi} h \bar{\delta}_{\varphi}; \quad B_x = E_x h \bar{\delta}_x; \quad B_y = E_y h \bar{\delta}_y \quad (6)$$

Відносні товщини спіральних, осевих та кільцевих ребер вираховуються за формулами:

$$\bar{\delta}_{\varphi} = \frac{\delta_{\varphi}}{a_{\varphi}}; \quad \bar{\delta}_x = \frac{\delta_x}{a_x}; \quad \bar{\delta}_y = \frac{\delta_y}{a_y} \quad (7)$$

Вищезазначені рівняння використовуються для побудови континуальних моделей сітчастих конструкцій, в яких ребра розподілені по поверхні оболонки, а також дискретних моделей побудованих методом скінчених елементів (МСЕ), де ребра моделюються як балкові скінченні елементи. Скінченно-елементна модель (СЕМ) може створюватися за допомогою розбиття на скінченні елементи вже наявної геометричної моделі.

Приклад скінченно-елементної моделі та елементарного сегмента ґратчастої конічної оболонки з геодезичною траєкторією спіральних ребер з висотою оболонки H , діаметрами верхньої та нижньої частин $D1$ та $D2$, а також з кутом орієнтації ребра в нижній частині оболонки ϕ_1 зображено на рис 3.а.

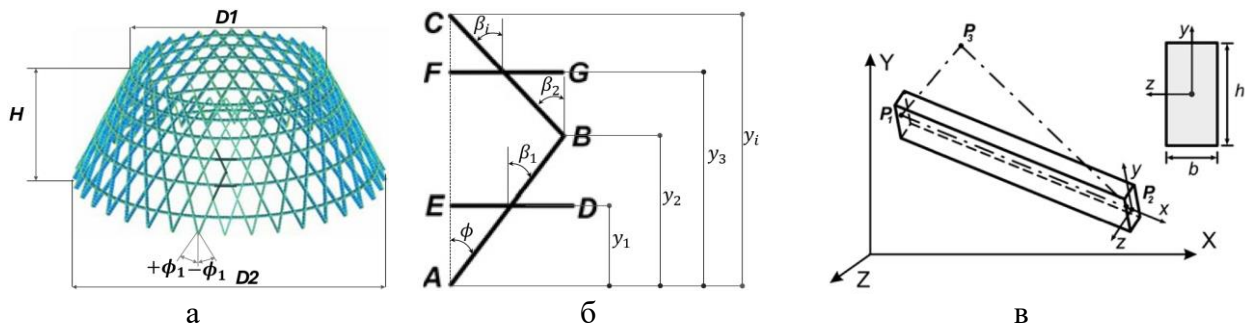


Рис 3. Скінченно-елементна модель та елементарний сегмент сітчастої конічної оболонки з геодезичною траєкторією спіральних ребер, а – геометрія та розміри моделі, б – елементарний елемент сітчастої структури, в – скінчений елемент типу BEAM3D

Скінченно-елементна модель оболонки створюється на основі типового елементарного блоку сітчастою структурою, що складається з двох сегментів спіральних ребер АВ та ВС і двох сегментів кільцевих ребер ED та FG як зображено на рис 3.б. Сітчаста оболонка моделюється у вигляді тривимірної каркасної конструкції за допомогою елемента BEAM3D доступного, наприклад, в програмі COSMOS/M. Точки $P1$ та $P2$ це вузли елемента які характеризуються шістьма ступенями свободи, а точка $P3$, яка розташована у площині $x-y$, здійснює орієнтацію елемента у глобальній системі координат XYZ , рис. 3.в.

Задача побудови геометричної моделі сегмента зводиться до визначення координат початкових і кінцевих точок кожного відрізка сегмента у заданій системі координат залежно від основних проєктних параметрів оболонки. Основними параметрами для ґратчастої конічної оболонки є: висота конуса H , радіус основи конуса r , кут нахилу твірної конуса γ , кількість спіральних ребер n та кут виходу спірального ребра ϕ .

Для визначення координат початкових і кінцевих точок відрізків, з яких складається сегмент, вводиться поняття «пояс точок перетину ребер» — це точки перетину ребер, що лежать в одній горизонтальній площині та змінна i , що позначає порядковий номер такого «пояса». Координати початкових і кінцевих точок відрізків безпосередньо залежать від того, у якому «поясі точок перетину ребер» вони розташовані. Координата $y(i)$ -го поясу точок зображеного на рис 3.б. визначається за формулами (8, 9), а значення a , b , ω та θ визначають по розгортці конічної оболонки, рис. 4.

$$y(i) = a(i) \cdot \sin(\gamma); a(i) = \frac{b(i) \cdot \sin(\beta(i) + \omega(i))}{\sin \beta_i}; b(i) = \frac{2 \cdot r}{\cos(\gamma)} \cdot \left(\sin \left(\frac{\theta \cdot i}{8} \right) \right) \quad (8)$$

$$\theta = \frac{360^\circ \cdot \cos(\gamma)}{n}; \beta(i) = \left(\phi + \frac{\theta \cdot i}{4} \right); \omega(i) = \left(90^\circ + \frac{\theta \cdot i}{8} \right) \quad (9)$$

Для визначення кількості поясів точок і залежно від висоти адаптера використовуємо рівняння Клеро [6], яке визначає спіральну траєкторію ребер за допомогою радіуса i -го поясу $r(i)$:

$$\sin(\phi) \cdot r = \sin(\beta(i)) \cdot r(i) \quad (10)$$

Якщо у рівняння Клеро підставити рівняння (9) для $\beta(i)$ та рівняння (11) для $r(i)$, то рівняння Клеро прийме вид як показано у формулі (12):

$$r(i) = r - \frac{H}{\tan(\gamma)} \quad (11)$$

$$\sin(\phi) \cdot r = \sin \left(\phi + \frac{\theta \cdot i}{4} \right) \cdot \left(r - \frac{H}{\tan(\gamma)} \right) \quad (12)$$

З рівняння (12) можна виразити змінну i . Підставив у рівняння (13) конкретні значення, отримаємо значення числа i , яке округляється до найближчого цілого числа заради практичних цілей.

$$i = \frac{-\phi + \arcsin\left(\frac{r \cdot \sin(\phi) + tg(\gamma)}{r \cdot tg(\gamma) - H}\right)}{\theta} \quad (13)$$

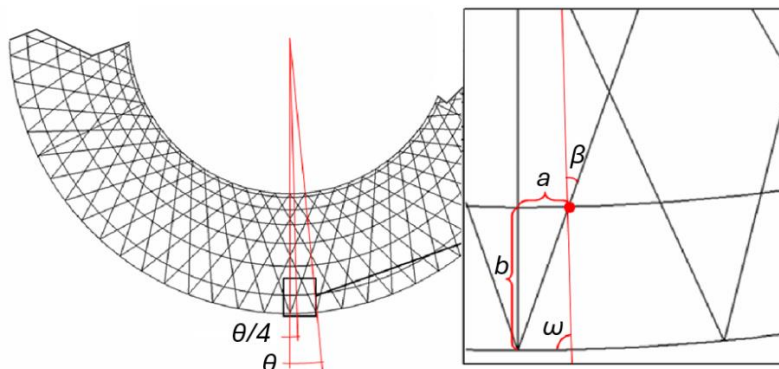


Рис 4. Розгортка сітчастої конічної оболонки

Розглянуті особливості геометричного моделювання та чисельного аналізу сітчастих конструкцій з композитних матеріалів, а також аналітичні вирази отримані з загальної теорії оболонок з композитних матеріалів є основою для розробки та геометричної параметризації моделей сітчастих оболонок з геодезичною траєкторією спіральних ребер. Використані рівняння та параметри демонструють можливість побудови моделей, придатних для проєктування адаптерів та інших відповідальних елементів аерокосмічної техніки.

Науковий керівник: д.т.н., проф. Малков І. В.

Список використаних джерел:

1. V C A D Murthya, Soundarapandian Santhanakrishnananb. Isogrid lattice structure for armouring applications // 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48. Procedia Manufacturing Volume 48 – 2020. P. e1-e11.
2. Totaro G. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with hexagonal cells // Composite Structures. 2013. Vol. 95. P. 403–410.
3. Hou A., Gramoll K. Compressive strength of composite latticed structures // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1998. Vol. 17. P. 462–483
4. V.V Vasiliev, V.A Barinin, A.F. Razin. Anisogrid composite lattice structures–Development and aerospace applications // Composite Structures. 2012. Vol. 94. P. 1117–1127.
5. Zhang Y., Xue Z., Chen L., Fang D. Deformation and failure mechanisms of lattice cylindrical shells under axial loading // International Journal of Mechanical Sciences. 2009. Vol. 51, P. 213–221.
6. Morozov E., Lopatin A., Nesterov V. Buckling analysis and design of anisogrid composite lattice conical shells // Composite Structures. 2011. Vol. 93. P. 3150-3162.

Vasyl Ruzaikin, Associate Professor
v.ruzaykin@khai.edu

Andrii Breus, Associate Professor
a.breus@khai.edu

Olena Torosian, Senior Lecturer
o.tarasyan@khai.edu

Ivan Lukashov, assistant
lukashevi@gmail.com

FEATURES OF THE PHASE DISTRIBUTION OF AMMONIA FLOW IN TEE CONNECTIONS

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine

Phase separation of a two-phase working fluid accompanies the thermal-hydraulic process in every system and device, with at least one T-junction used in a two-phase line. Adequate qualitative and quantitative prediction of phase separation in T-junction is critical for successful designing, e.g., refrigeration, thermal control, and fluid transport systems. Three simple T-junctions with different inlet and side diameters were tested in the horizontal position on two-phase ammonia at a saturation level of $40\div 60^\circ\text{C}$ and mass velocities of $25\div 150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Based on test data, it has been revealed that at the relative side branch mass flow rate above 0.6, the phase separation behaviour does not depend on inlet mass velocity, vapour quality, void fraction, flow patterns (stratified, slug and annular) and relative side branch diameter. A simplified empirical correlation has been proposed describing the ammonia test points with an error margin of $\pm 15\%$.

The principle layout of the test bench to study two-phase ammonia phase separation in the T-junction is shown in Fig. 1, with the general views in Fig. 2. The test bench represents a typical two-phase mechanically pumped loop. It consists of a heat-controlled accumulator (HCA), circulation pump (Pump 1), flow evaporator (EV1) and condenser (MC).

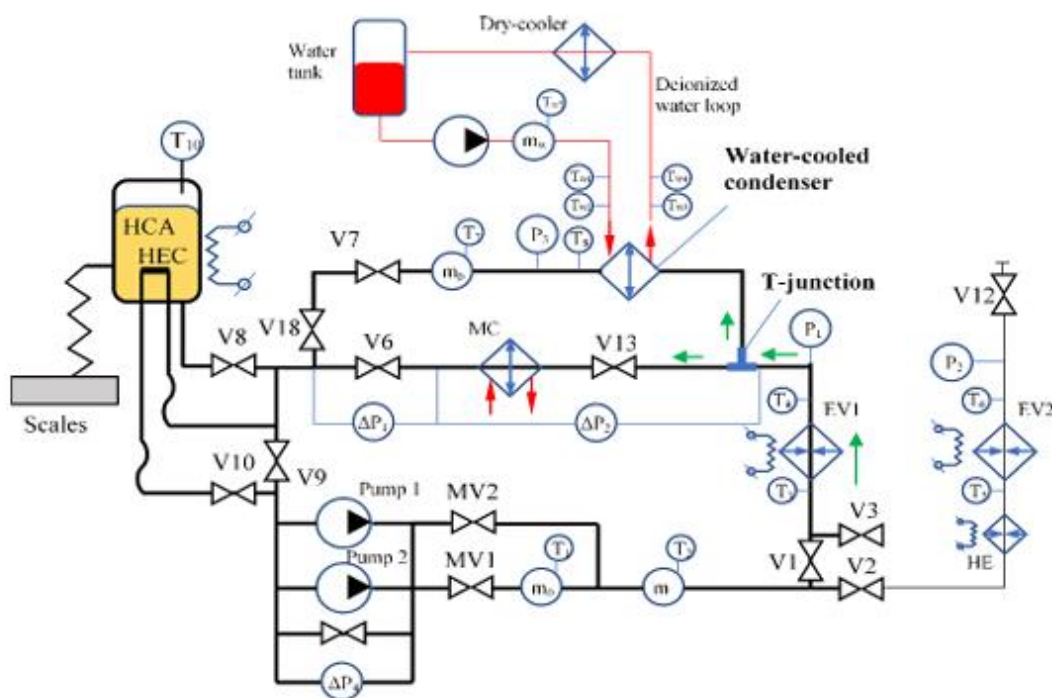


Fig. 1. Principle layout of test-bench



Fig. 2. General view of test-bench

Many factors impact the phase separation phenomenon in T-junction: the geometry of the T-junction, side branch position, two-phase flow pattern, fluid properties, flow pre-history, gravity orientation, and even the wetting properties of the liquid-solid interface.

A complete understanding of the phase separation in T-junction, from qualitative and quantitative points of view, could help increase the efficiency of such systems and make the performances of future ammonia thermal control systems entirely predictable, which is very important for space and critical ground technology. In this connection, the experimental study dealing with the phase separation of ammonia in T-junctions is valuable and could improve the efficiency of future ammonia systems.

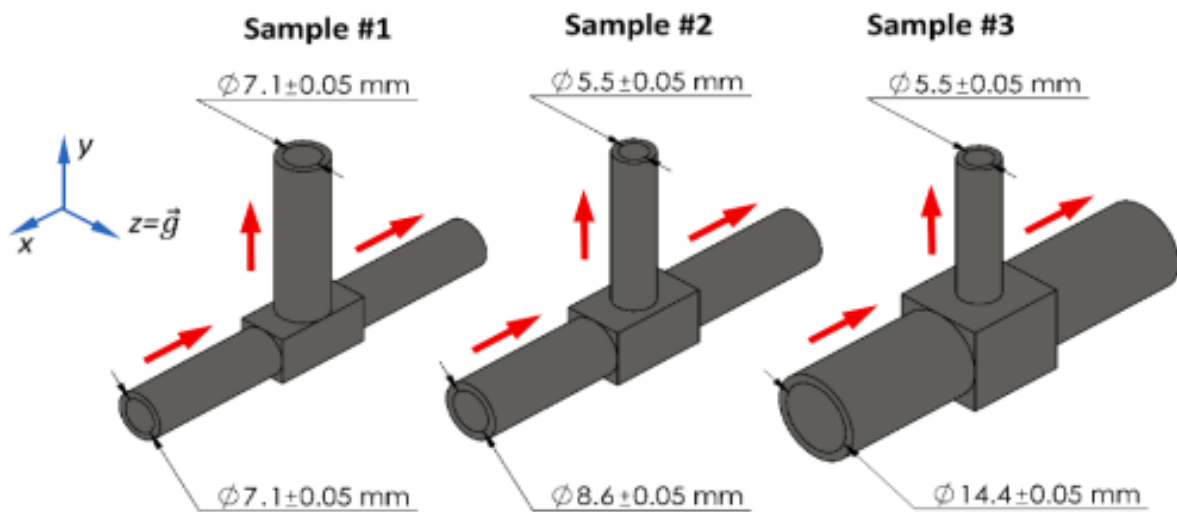


Fig. 3. Geometry of T-junctions.

The general view of the T-junctions samples is shown in Fig. 1. They have been chosen for the test as the parts of the ammonia mechanically pumped loop in the framework of engineering activity. The samples have been manufactured as a single part by milling. The material of T-junctions is 316 L stainless steel (bar). The machining tools provide the internal surface's roughness of $Ra\ 1.25\ \mu\text{m}$. T-junctions have been checked for the burrs and cleaned with the benzine and IPA fluid in an ultrasonic bath.

The T-junctions are integrated alternately into the test bench by Swagelok fittings in the horizontal position of the inlet and side branch axis (H-H). The diameter of connecting tubing has been selected close to the T-junction one. The straight tubing part with a length of 500 mm is foreseen at the inlet of the T-junction to have a stabilised two-phase flow pattern.

The ammonia phase separation in three horizontal T-junctions with different relative side branch diameters ($DR=0.38, 0.64$ and 1.00) has been studied experimentally at low mass flow velocities of $25 \dots 150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Based on test data, it has been revealed that at the relative mass flow rate in the side branch ($F > 0.6$), the phase separation behaviour does not depend on inlet mass velocity, vapour quality, void fraction, flow patterns (stratified, slug or annular) and relative side branch diameter (DR). A simplified correlation is proposed for the $F > 0.6$ cases with an error margin of $\pm 5\%$. Another simplified empirical correlation has been submitted to cover the cases $0 < F < 1$ describing the ammonia test points with an error margin of $\pm 15\%$. The simplified correlations and test data presented in this paper can be helpful for the engineers designing the low power ammonia systems, including refrigeration and air-conditioning units, two-phase heat transfer loops and test benches.

Vasil Ruzaikin, Associate Professor
v.ruzaykin@khai.edu

Ivan Lukashov, assistant
lukashevi@gmail.com

Andrii Breus, Associate Professor
a.breus@khai.edu

Olena Torosian, Senior Lecturer
o.tarasyan@khai.edu

STUDY OF THE ACCURACY OF THE CAPILLARY RISE METHOD IN DETERMINING THE EQUILIBRIUM CONTACT ANGLE BETWEEN AMMONIA AND STAINLESS STEEL

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine

Wettability is the essential property of liquid and solid body interaction, mainly in the presence of the gas phase. From the biological system applications to heavy industry objects, where the contact of liquid with a solid surface is designed, the wettability more or less determines the quality and performance of the products. In the specific system with liquid, solid and gas being in the equilibrium state at fixed pressure and temperature, there is only one value of equilibrium contact angle that could be identified from experiments only. Thus, the activities dealing with designing innovative systems with novel materials for alternative applications, where wettability, capillary, and adhesion effects play an essential role, must be accompanied by contact angle studies. For instance, the estimations of the contact angle are used in different models of nucleate pool boiling, dropwise condensation, mass transfer in capillary channels and structures, in capillary head models of heat pipes and loop heat pipes wicks, in liquid-gas separation models in microgravity, droplet generations, droplet deposition as well as in models of liquid drainage from vessels in microgravity.

The purpose of this method is not just to represent the ammonia-stainless steel interface contact angle values but also to outline the simple and cheap approach for studying low boiling fluid wettability made for the specific engineering product.

The test sample represents a plate of stainless steel (316 L) with measured roughness in the range R_a 0.362 ... 0.765 μm and the surface structure typical for rolling manufacturing technology. The test was carried out with a sample with the following dimensions of 19.5×200 mm. The sample was cut from a standard 1.5 mm SS316L sheet. It was cleaned in an ultrasonic bath with IPA fluid. No visible impurities were observed. Then, the test sample was placed vertically in the middle of a high-pressure sight window with a rectangular cross-section (20×20 mm).

During the tests, the absolute pressure (P) is measured with gauge PMC-71 (Endress&Hauser) at an accuracy of ± 5 kPa. Surface temperatures (T1 and T2) are measured with RTD100 sensors at ± 0.5 °C accuracy. The cooling lines and electrical heaters are foreseen in design to change the saturation conditions in the transparent chamber within a wide range. The test bench is filled with ammonia of N50 purity and pressurised slightly by argon gas. After reaching a steady state, which is observed by the pressure and temperature readings, the images of NH₃-SS interface geometry are taken with the camera (Nikon 7200 with Mikro Nikkor 105 mm 1:2.8G lens).

Three cases were tested with N50 ammonia at the liquid temperature in the range $[-11 \dots 75]$ °C as this represents the most typical engineering activities. The uncertainty range of contact angle identification is defined based on average measured heights and determined above the accuracy of height identification ($\pm 0,1$ mm).

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ФІТИНГІВ У СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ КАБЕЛІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасних енергетичних та промислових системах, що функціонують за високих навантажень, усе ширше застосовуються кабелі з рідинним охолодженням. Ефективність і надійність таких систем значною мірою залежать від герметичності, термостійкості та механічної міцності з'єднувальних елементів — фітингів. Неправильний вибір конструкції фітингів або помилки під час монтажу можуть призвести до витоків охолоджувальної рідини, перегріву кабелів, виходу з ладу обладнання або створення аварійних ситуацій.

Незважаючи на важливу роль фітингів у забезпеченні безперебійної роботи охолоджувальної системи, в науковій і технічній літературі спостерігається обмежена кількість узагальнених досліджень, що розкривають конструктивні особливості цих компонентів з урахуванням специфіки експлуатації. Це обумовлює необхідність системного аналізу технічних вимог до фітингів, принципів їх проектування та підбору матеріалів для використання у кабельних охолоджувальних системах.

Основними проблемами застосування систем охолодження кабелів є: вибір оптимальної конструкції кабелю та фітингів, вибір охолоджуючої рідини в залежності від конструкції, тепловий розрахунок системи для вибору радіатора охолодження.

Повний огляд конструкцій систем охолодження кабелів та рідин, що в них використовуються, було розглянуто у [1, 2]. З огляду було зроблено висновок, що для застосування у системі заряджання електромобілів, найефективнішою є система що показана на рисунку 1.

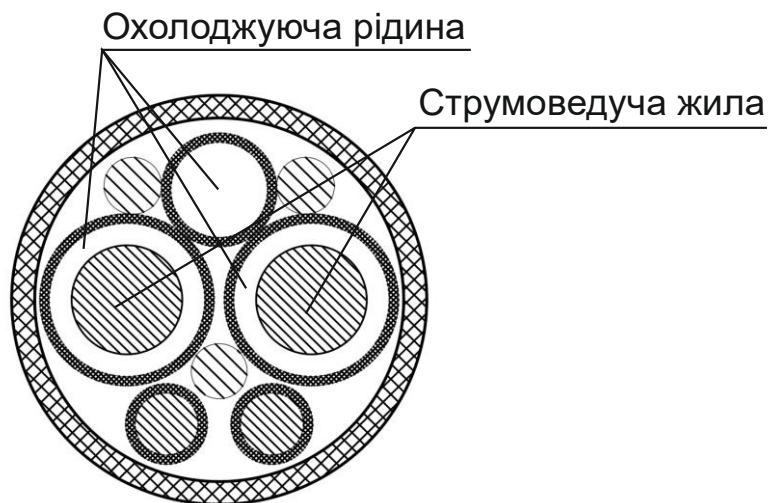


Рис. 1. Схема кабелю з розміщенням струмопровідних жил у середині трубок з охолоджуючою рідиною

У наведеній конструкції застосовують діелектричні рідини особливістю використання яких було розглянуто у [2].

Дана робота присвячена особливостям конструкції фітингів для вищезазначеної конструкції кабелю. Розглянемо систему охолодження кабелю рідиною у зарядних станціях для електромобілів.

Конструктивно системи наведена на рисунку 2.

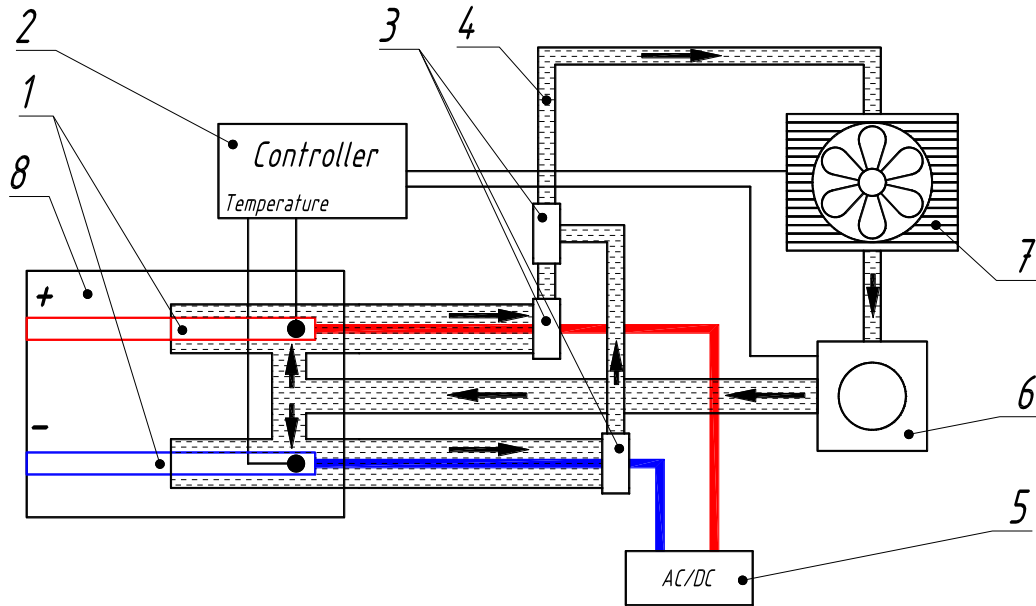


Рис. 2. Схема роботи системи охолодження

1 – Контакти, 2 – Контролер системи охолодження, 3 – Фітинги, 4 – Охолоджувальна рідина,
5 – Інвертори зарядної станції, 6 – Насос 7 – Радіатор,
8 – Роз'єм, який з'єднується з автомобілем

Особливість фітингів, що використовуються у зазначеній системі, полягаю у тому що скрізь проходить жила кабелю з напругою та рідина навколо нього, необхідно забезпечити герметичність системи з відводом теплоти від кабелю на роз'ємів. На рисунку 3 показано конструкцію фітингу.

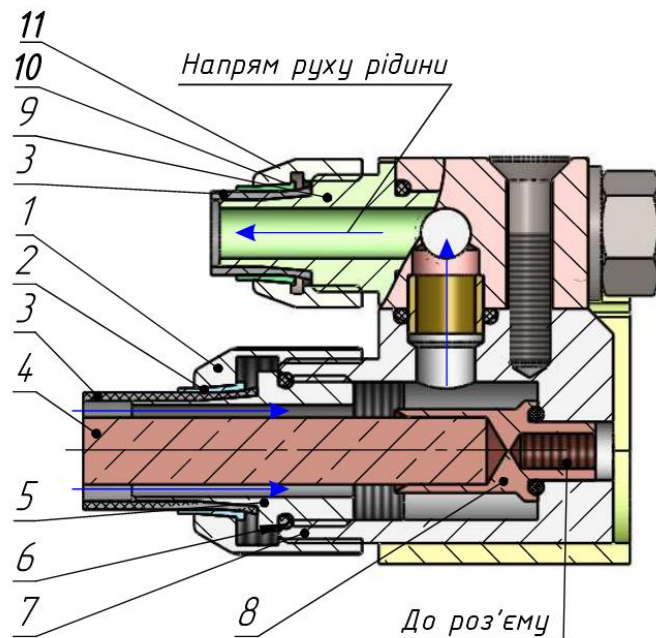


Рис. 3. Конструкція фітингу системи охолодження роз'єму зарядання електромобілів

У середині трубки 3 проходить силова жила 4, навколо неї циркулює охолоджуюча речовина. Силовa жила обтискається у 8 до якого від'єднується контакт, що йде до автомобілю. Напрямок руху охолоджуючої рідини показано стрілками. Для забезпечення герметичності та

надійного кріплення поліамідна трубка 3 натягується на патрубок 5 та зверху прижимається кільцем 2, яке прижимається гайкою 1. Конструкція фітингу виходу охолоджуючої рідини зроблено таким самим чином. Поліамідна трубка 3 натягується на патрубок 9, зверху притискається кільцем 10 та затискається гайкою 11.

Особливість розглянутого з'єднання полягає у використанні додаткових кілець 2 та 10, що дають змогу здавити та деформувати поліамідну трубку не пошкоджуючи її.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що конструкція фітингів відіграє ключову роль у забезпеченні надійної та безпечної роботи систем рідинного охолодження кабелів у зарядних станціях для електромобілів. Забезпечення герметичності, термостійкості та механічної міцності з'єднань є критично важливими для запобігання витокам охолоджуючої рідини та перегріву силових жил. Запропонована конструкція фітингу дозволяє ефективно реалізувати ці вимоги завдяки використанню поліамідних трубок, ущільнювальних кілець та з'єднувальних елементів, що забезпечують надійне та довговічне з'єднання без пошкодження трубки. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на оптимізації геометрії фітингів та підборі матеріалів із покращеними властивостями, що дозволить ще більше підвищити ефективність охолодження та експлуатаційну надійність системи в умовах високих навантажень.

Список використаних джерел

1. Саєнко С. Ю., Мсаллам К. П. Особливості рідин у системі охолодження кабелів // Світ наукових досліджень. Вип. 42. Електронне видання. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/6242/>
2. Saienko, S. Yu. et al. Computer-Aided Design of Innovative Liquid Cooling Systems for Cables in Electric Vehicle Charging Stations: Analysis and Prospects // Open Information and Computer Integrated Technologies. No. 103, May 2025, pp. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.103.03>
3. Patnaik, P. Design and Analysis of Mechanically Joined Fluid Systems for High-Performance Cooling Applications // Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, Vol. 12(6): 061007. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047122>
4. Поляков С. М. Герметичні з'єднання в енергетичних системах з рідинним охолодженням // Вісник технічних наук. – 2021. – №4. – С. 42–48.
5. Dincer, I., & Rosen, M. A. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. 3rd ed. – Wiley, 2021. – 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119713135>

**АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
НА ВОДНЕВИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ**

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Відомо, що безпілотні літальні апарати (БПЛА), що відносяться до галузі робототехніки стали ключовим елементом сучасного суспільства, застосовуючись як у цивільних, так і в військових сферах діяльності. Традиційні джерела живлення, зокрема акумулятори, не дозволяють забезпечити стабільну тривалість польотів БПЛА, що стримує їх потенціал та розвиток в майбутньому. Аналізуючи наукові роботи присвячені дослідженню БПЛА різних типів зосереджувалися на акумуляторних технологіях, які обмежують час у повітрі через низьку енергоємність і значну масу систем [1-3]. Паливні елементи з протонно-обмінною мембраною (РЕМ) мають високу продуктивність, безшумність, відсутність вібрацій та нульові викиди парникових газів. Завдяки винятковій питомій енергії водню, яка значно перевищує показники двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторних рішень, можливо суттєво збільшити тривалість роботи БПЛА [4].

Системи на базі водневих паливних елементів (ВПЕ) демонструють енергоємність від 250 до 540 Вт·год/кг [4, 5], що дозволяє збільшити тривалість польоту до трьох разів порівняно з літій-іонними батареями (130–200 Вт·год/кг) аналогічної маси, роблячи їх ідеальними для тривалих місій. Також суттєвий вплив має показник корисного навантаження (маса, яку може нести одиниця потужності) для таких БПЛА становить приблизно 10 г/Вт, що суттєво обмежує масу літій-іонних батарей, які пристрій здатен підняти. Це призводить меншого часу автономного польоту, який не перевищує 40 хв. Перехід на системи з ВПЕ значно підвищує витривалість БПЛА та спрощує процес зарядки та зменшує навантаження на операторів.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз різних типів паливних елементів [2-5].

Параметр	DMFC	PEMFC	SOFC
Робоча температура/°C	<120	<120	800–1000
Випромінювана потужність	<5 кВт	5–250 кВт	100–250 кВт
Тип електроліту	Мембрана Nafion	Мембрана Nafion	Цирконій стабілізований ітрієм
Реакція на аноді	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Реакція на катоді	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
Переваги	Просте зберігання палива, проста конструкція без термічного управління	Висока щільність потужності, швидкий запуск	Різноманітне паливо, не благородний метал для каталізатора
Недоліки	Низька щільність потужності	Низька енергоємність при зберіганні водню під високим тиском у метал-гідридах	Повільний запуск і складне допоміжне обладнання через високу робочу температуру

Окрім обмежень, пов'язаних з енергоемністю, літій-іонні батареї мають додаткові недоліки, а саме [1-3]: схильність до коротких замикань або перезаряджання, що ускладнює їхнє довготривале застосування; значне нагрівання під час роботи яке може спровокувати займання БПЛА при досягненні критичної температури; тепловиділення робить БПЛА вразливими до виявлення інфрачервоними датчиками, що обмежує їхнє використання у військових операціях; переробка таких батарей негативно впливає на екологію. В свою чергу, паливні елементи мають утричі довший термін служби [5] і під час роботи виділяють лише воду, що робить їх більш екологічними.

Найпоширенішими типами ВПЕ є паливні елементи з протонно-обмінною мембраною (PEMFC), прямогопливні елементи на метанолі (DMFC) та твердооксидні паливні елементи (SOFC). Їхні робочі температури, механізми реакцій, а також сильні та слабкі сторони проаналізовані в Таблиці 1. З-поміж них PEMFC вирізняються малою масою, високою енергоемністю, низькою робочою температурою та швидким запуском, що зумовлює їхню широку популярність у безпілотних літальних апаратах [24].

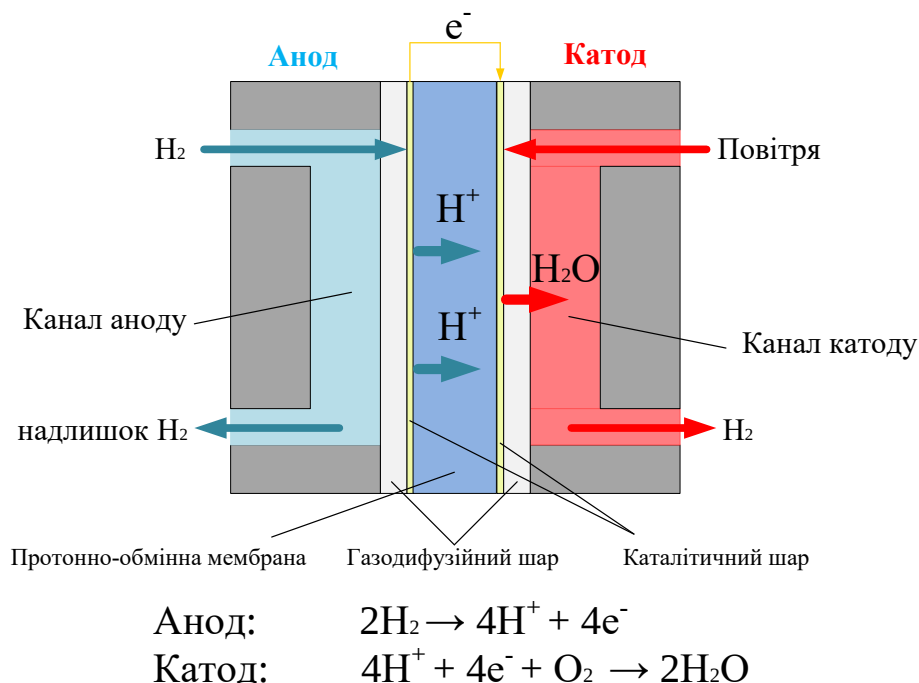


Рис. 1. Конструкція одноосередкової системи паливних елементів із протонно-обмінною мембраною (PEMFC)

На рис. 1, показана типова конструкція PEMFC, яка складається з катодного та анодного проточних каналів, газодифузійного шару, каталітичного шару та протонно-обмінної мембрани. Принцип роботи полягає в наступному, коли водень, проходячи через анодний канал, проникає в газодифузійний шар, де під впливом каталітичного шару втрачає електрони, а протони переміщуються до катодної сторони через протонно-обмінну мембрану. Кисень, проходячи через катодний канал, також дифундує в газодифузійний шар і, з'єднуючись із протонами, що перемістилися мембраною, та електронами з зовнішнього контуру, утворює воду під дією каталізатора. Ці процеси забезпечують безперервне генерування струму між катодом і анодом. Зазвичай катодний і анодний канали інтегруються на передній і задній поверхнях однієї провідної пластини, утворюючи біполярну пластину, тоді як газодифузійний шар, каталітичний шар і протонно-обмінна мембрана з'єднуються в мембранно-електродний вузол (MEA). Така архітектура дає змогу з'єднувати й складати стеки ВПЕ у конфігурацію «біполярна пластина-мембрана-електрод-біполярна пластина». Для підвищення ефективності БПЛА та розширення їхнього спектра використання потрібні глибші наукові дослідження цієї проблематики, конструювання та стратегічного планування.

Аспекти, на які варто звернути увагу в майбутніх дослідженнях БПЛА на ВПЕ:

1. Удосконалення способів зберігання водню. Тривалий час польоту є головною перевагою водневих паливних елементів як джерела енергії для багатороторних БПЛА. Щоб максимально використати цей потенціал, майбутні напрацювання мають зосередитися на створенні легких конструкцій, вдосконаленні методів зберігання водню та розробці ефективних стратегій енергетичного менеджменту. Зокрема, оптимізація зберігання водню, особливо через доступне за ціною твердотільне накопичення, може суттєво подовжити час польоту. Якщо це буде реалізовано, водневі БПЛА зможуть виконувати довготривалі перельоти на значні відстані, відкриваючи для БПЛА індустрії нові горизонти змін.

2. Система фільтрації катодного газу. Оскільки катод у паливних елементах із відкритим катодом і повітряним охолодженням безпосередньо контактує з атмосферою, забруднене повітря робочого середовища може пошкодити мембранно-електродний вузол. Це скорочує експлуатаційний термін елемента, ускладнюючи використання БПЛА у забруднених умовах, таких як вугільні шахти чи хімічні виробництва. Для розширення можливостей застосування таких БПЛА необхідні подальші розробки в галузі катодних систем фільтрації.

3. Допоміжне обладнання. Щоб забезпечити масове впровадження водневих БПЛА, окрім самого літального апарата, потрібно комплексно підходити до розробки технологій для зберігання, транспортування водню та його заправки. На відміну від транспортних засобів на водневих елементах, БПЛА споживають незначні обсяги водню, що дає змогу створити портативні мобільні заправні станції, адаптовані до частого використання.

Розробка водневих БПЛА — це комплексний проєкт, який об'єднує інновації в енергетиці, робототехніці, управлінні енергією та інших галузях. Його еволюція тісно пов'язана з досягненнями в базових науках, таких як матеріалознавство, хімія та термодинаміка. Це вказує на те, що за умови правильного розвитку водневих БПЛА у майбутньому їхні дослідження стануть дедалі спеціалізованішими, а проєктування на вищому рівні набуде ключового значення.

Список використаних джерел

1. González-Jorge, H.; Martínez-Sánchez, J.; Bueno, M.; Arias, P. Unmanned Aerial Systems for Civil Applications: A Review. *Drones* 2017, 1, 2.
2. Shakhathreh, H.; Sawalmeh, A.H.; Al-Fuqaha, A.; Dou, Z.; Almaita, E.; Khalil, I.; Othman, N.S.; Khreishah, A.; Guizani, M. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access* 2019, 7, 48572–48634.
3. Vachtsevanos, G.J.; Valavanis, K.P. Military and Civilian Unmanned Aircraft. In *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2015; pp. 93–103.
4. Cwojdzki ński, L.; Adamski, M. Power units and power supply systems in UAV. *Aviation* 2014, 18, 1–8.
5. Santos, D.F.M.; Ferreira, R.B.; Falcão, D.S.; Pinto, A.M.F.R. Evaluation of a fuel cell system designed for unmanned aerial vehicles. *Energy* 2022, 253, 124099.
6. Ozbek, E.; Yalin, G.; Karaoglan, M.U.; Ekici, S.; Colpan, C.O.; Karakoc, T.H. Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 16453–16464.
7. Depcik, C.; Cassady, T.; Collicott, B.; Burugupally, S.P.; Li, X.; Alam, S.S.; Arandia, J.R.; Hobeck, J. Comparison of lithium ion Batteries, hydrogen fueled combustion Engines, and a hydrogen fuel cell in powering a small Unmanned Aerial Vehicle. *Energy Convers. Manag.* 2020, 207, 112514.

РОЗВИТОК ТА ЗАСТОСУВАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ У ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Нанотехнології – це міждисциплінарна галузь науки і техніки, що займається розробкою, дослідженням, проєктуванням та застосуванням матеріалів, пристроїв і систем, функціонування яких визначається наноструктурою (розмірами від 1 до 100 нанометрів). Вони дозволяють маніпулювати речовиною на атомно і молекулярному рівнях для створення нових матеріалів та пристроїв з унікальними властивостями [2].

Основні напрямки розвитку нанотехнологій в електротехніці, в розрізі питань застосування наноматеріалів для провідників та ізоляторів є:

- підвищення провідності – використання нанопроводів, графену та вуглецевих нанотурбо для створення високопровідних матеріалів, що дозволяють зменшити втрати енергії та розміри електронних компонентів;
- покращення ізоляційних властивостей – розробка нанокомпозитних діелектриків з підвищеною електричною міцністю та термостійкістю, що важливо для високовольтних застосувань.

Завдяки нанотехнологіям можна створювати матеріали з унікальними властивостями, які неможливо отримати традиційними методами. Так це можна продемонструвати на прикладі нанотехнічних сонячних елементів для генерації електроенергії. Нанотехнічні сонячні елементи вирізняються унікальною енергоефективністю та економічною вигодою. Це досягається завдяки нанесенню тонкоплівкового шару на основі мідно-індієво-галій-диселеніду (CIGS) для створення ефективного, довговічного сонячного елемента [1]. Цей напівпровідник у 100–200 разів тонший за кремнієві пластини, що використовуються в інших напівпровідникових застосуваннях, а процес штампування та друку в 10 разів швидший порівняно з традиційним методом тонкоплівкового осадження в умовах високого вакууму. За результатами лабораторних експериментів, елементи CIGS демонструють коефіцієнт перетворення сонячного світла в електроенергію на рівні 20–21%, що значно перевищує показники більшості кристалічних кремнієвих технологій. Крім того, використання нано-CIGS зменшує розмір сонячних елементів приблизно на 20%, а собівартість виробництва значно нижча, ніж у випадку традиційних тонкоплівкових елементів. Інші наноматеріали, такі як нанокристали (високоєфективні нанодоти) та нанотрубкові масиви, мають значний вплив у сфері генерації електроенергії за допомогою наноелементів. Високоєфективні напівпровідникові нанокристали (нанодоти), які активні в усьому видимому спектрі та частково в ближньому інфрачервоному діапазоні, сприяють створенню надпродуктивних сонячних елементів. Високоорганізовані нанотрубкові масиви мають унікальні властивості, що застосовуються в сонячних елементах.

Нанотехнологія відіграє значну роль у розподіленій генерації та підстанціях завдяки розробці економічно вигідних акумуляторів і конденсаторів для зберігання енергії. Вуглецеві нанотрубки (CNT) мають велику поверхню, хорошу провідність і оптимальну геометрію, що робить їх придатними для доступу до електроліту в батареях. Завдяки цим властивостям електролітів підвищується ефективність генерації порівняно з традиційними електролітами. Таким чином, ця технологія дозволяє створювати менші, легші та потужніші батареї [3].

Суперконденсатори сприяють передачі більшої потужності від джерела до кінцевого пункту, покращуючи коефіцієнт потужності системи. Електролітичні конденсатори нині використовуються для широкого спектру застосувань із ємністю від кількох мікрофарад до сотень мікрофарад, з'єднуючись послідовно або паралельно для ефективної передачі енергії.

Хоча вони корисні для передачі потужності, цей метод є дорогим. Завдяки швидким можливостям заряджання та розряджання протягом сотень тисяч циклів суперконденсатори знаходять широке застосування в комерційних системах зберігання енергії, включаючи рекупераційні гальмівні системи в залізницях, вирівнювання навантаження та гібридні електромобілі, а також комунальні мережі. Компанія Applied Nano-structured Solutions (ANS) розробила суперконденсатори з значним підвищенням їхньої продуктивності, зокрема збільшенням ємності приблизно на 200%. Інші суперконденсатори, такі як вуглецеві наноструктури (CNS), наприклад, паперові CNS-суперконденсатори, працюють як в органічних, так і в водних розчинах [1].

Нанотехнологія має значний потенціал для розробки застосувань і продуктів у широкому спектрі наук і технологій, а також у електричних системах. Для впровадження нанотехнологічних рішень у секторі електротехніки необхідно мати глибоке розуміння електричних систем та проблем, з якими вони стикаються. В дослідженні зроблено спробу акцентувати увагу на цій технології та знайти відповідні рішення через нанотехнології та можливе впровадження нанотехнологій у сфері генерації електроенергії. Також дослідникам варто більше працювати над цією новою вигідною технологією, яка корисна в багатьох аспектах країни.

Список використаних джерел

1. Lehtonen M., Mahmoud K. Nanomaterials-Based Catalysts in Electrical Engineering Applications // Catalysts. - 2024. - Т. 14. - С. 123-135. - DOI: 10.3390/catal14010123.
2. Bossmann S. H. et al. Iron-Based Magnetic Nanosystems for Diagnostic Imaging and Drug Delivery: Towards Transformative Biomedical Applications // Pharmaceuticals. - 2022. - Т. 14, № 10. - С. 2093. - DOI: 10.3390/pharmaceutics14102093.
3. Lehtonen M., Mahmoud K. Nanomaterials-Based Catalysts in Electrical Engineering Applications // Catalysts. - 2024. - Т. 14. - С. 123-135. - DOI: 10.3390/catal14010123.
4. Mohamed A. T. Emerging Nanotechnology Applications in Electrical Engineering. - Hershey : Engineering Science Reference, 2021. - 320 с.

ВПЛИВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У машинобудуванні ефективність проєктування конструкцій значною мірою залежить від застосування цифрових інструментів візуалізації. Візуалізація дозволяє інженерам краще розуміти складну просторову структуру об'єктів ще на етапі планування, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих технічних рішень.

Візуалізація забезпечує точне просторове уявлення про конструкцію, дозволяє інженерам бачити, як саме працюватимуть окремі елементи у взаємодії. Це не лише спрощує розуміння проєкту, але й дає змогу виявити потенційні помилки ще на ранніх етапах. Наприклад, просторові колізії між інженерними мережами та елементами несучого каркаса можуть бути виявлені ще на стадії цифрового моделювання, що дає змогу своєчасно ввести коригування в проєктну документацію та уникнути додаткових витрат під час робіт. Крім того, візуалізація істотно покращує комунікацію між усіма учасниками проєктного процесу. Замовники, інвестори, інженери — всі отримують наочну картину об'єкта, яка зрозуміла навіть без глибокої технічної підготовки. Це сприяє швидшому ухваленню рішень і зменшує ризик непорозуміння.

Ще один важливий аспект — це інтеграція з BIM-технологіями. Вони дозволяють поєднувати в одній моделі не тільки графіку, а й дані про матеріали, навантаження, вартість, терміни реалізації. Таким чином, ми отримуємо повноцінний цифровий двійник об'єкта — зручний для аналізу, оптимізації та подальшої експлуатації.

Інженерна візуалізація дозволяє проводити техніко-економічний аналіз альтернативних рішень. За допомогою візуальної моделі можна: порівнювати різні схеми армування чи типи з'єднань; оптимізувати витрати матеріалів; проводити енергетичне моделювання; формувати швидкі варіанти зміни геометрії без повторного розрахунку всієї системи вручну. Це особливо актуально для складних, нестандартних чи масштабних об'єктів, де конструктивні рішення мають бути як надійними, так і економічно обґрунтованими.

Інженерна візуалізація реалізується за допомогою сучасного програмного забезпечення, серед якого: Autodesk Revit, AutoCAD, Tekla Structures, SolidWorks, ArchiCAD, BIM 360, SCAD Office (для розрахунків у поєднанні з візуальним контролем).

Ці системи дозволяють не лише створювати точні моделі, а й аналізувати їх з точки зору навантажень, монтажної послідовності, експлуатаційних властивостей.

Візуалізація стає невід'ємною частиною сучасного проєктування конструкцій, дозволяючи досягати високої точності, ефективності та надійності проєктних рішень. Її впровадження сприяє зменшенню помилок, зниженню витрат, прискоренню процесів розробки та затвердження, а також покращенню комунікації між усіма учасниками проєкту. У зв'язку з цим подальший розвиток і вдосконалення візуалізаційних інструментів має стратегічне значення для галузі.

Таким чином, впровадження сучасних технологій візуалізації в процес проєктування конструкцій є невід'ємною складовою підвищення ефективності, надійності і економічності інженерних проєктів.

ВИКОРИСТАННЯ АРМУВАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ В ПОЛІУРЕТАНОВІЙ МАТРИЦІ ДЛЯ ВІБРОДЕМПФУЮЧИХ ТА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ РУХОМОГО СКЛАДУ

Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту
Національного транспортного університету, Україна

Вступ. У сучасних умовах інтенсивної експлуатації вантажного залізничного транспорту особливої актуальності набуває питання забезпечення надійного захисту конструктивних елементів вагонів від механічних пошкоджень, вібраційних навантажень, зносу та корозії. Одним з ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є застосування полімерних захисних покриттів, здатних виконувати як демпфуючі, так і протикорозійні функції.

Серед полімерних матеріалів поліуретани посідають чільне місце завдяки своїм унікальним властивостям – високій зносостійкості, еластичності, хімічній інертності та добрій адгезії до металевих поверхонь. Водночас, для покращення експлуатаційних характеристик поліуретанових покриттів до їх складу вводять армувальні наповнювачі, які дозволяють суттєво підвищити механічну міцність, демпфуючі властивості та опір до зовнішніх впливів.

Комбінування поліуретанової матриці з різними типами армувальних наповнювачів (волокнистими, мінеральними, наноструктурованими) відкриває широкі можливості для створення високоефективних композиційних матеріалів, здатних забезпечити тривалий захист вантажних вагонів у складних умовах експлуатації. Це зумовлює актуальність дослідження властивостей та способів застосування таких композитів у транспортній галузі.

Постановка проблеми. Вантажні вагони залізничного транспорту піддаються постійному впливу механічних навантажень, вібрацій, агресивних кліматичних та хімічних чинників. Це призводить до зношування елементів конструкції, зниження надійності, зростання частоти технічного обслуговування та витрат на ремонт. Зокрема, вібраційні навантаження сприяють виникненню втомних тріщин, а корозійні процеси — руйнуванню металевих поверхонь.

Традиційні захисні покриття не завжди здатні ефективно поєднувати функції вібродемпфування та антикорозійного захисту. Крім того, покриття часто мають обмежений термін служби та не забезпечують достатньої адгезії або механічної міцності в умовах інтенсивної експлуатації.

Поліуретанові композиції мають потенціал для вирішення цієї проблеми, однак їх базові властивості не завжди є достатніми для ефективного застосування без додаткового зміцнення. Введення армувальних наповнювачів дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики таких матеріалів, зокрема – підвищити міцність, зносостійкість, жорсткість та здатність до поглинання вібрацій.

Таким чином, постає проблема наукового обґрунтування доцільності та ефективності застосування армувальних наповнювачів у складі поліуретанових покриттів для підвищення їх демпфуючих та захисних властивостей при використанні на вантажних вагонах.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. У книзі [1] подано систематизований аналіз полімерних композиційних матеріалів для антикорозійного та зносостійкого захисту металевих конструкцій. Розглянуто властивості поліуретанів, методи їх модифікації та перспективи використання в промисловості. Цінне джерело для теоретичного обґрунтування вибору матриці. Стаття [2] присвячена експериментальному вивченню впливу мінеральних наповнювачів (тальк, каолін) на фізико-механічні властивості поліуретанових покриттів. Встановлено підвищення твердості та зносостійкості матеріалу при оптимальній концентрації наповнювача. У публікації [3] проаналізовано вплив різних типів наповнювачів на

триботехнічні характеристики поліуретанів у транспортних системах. Результати можуть бути використані для покриттів, які працюють в умовах сильного стирання і вібрацій. В роботі [4] автори узагальнюють сучасні технології нанесення полімерних покриттів у залізничному транспорті. Розглянуто проблеми адгезії, довговічності, впровадження поліуретанових систем у вітчизняному вагонобудуванні. Актуальне джерело для прикладного аспекту теми. Дослідження [5] демонструє, як вуглецеві нановолокна покращують демпфуючі властивості поліуретанів. Надано експериментальні графіки затухання вібрацій. Актуальне джерело для обґрунтування вибору нанонаповнювачів у транспортних конструкціях. Робота [6] присвячена створенню гібридних поліуретанових композицій із комплексними покращеннями – механічними, демпфуючими та термічними. Стаття важлива як приклад системного підходу до розробки полімерних матеріалів для транспорту. Автори [7] вивчають вплив нанонаповнювачів (зокрема графену, SiO_2) на антикорозійні та вібродемпфуючі властивості поліуретанів. Результати свідчать про значне покращення стійкості до агресивних середовищ і вібрацій, що важливо для умов експлуатації вантажних вагонів.

Постановка задачі. З огляду на актуальність проблеми захисту вантажних вагонів від вібраційних і механічних навантажень, а також необхідність підвищення довговічності покриттів у складних умовах експлуатації, постає необхідність у створенні нових полімерних композицій з покращеними характеристиками.

Основною метою роботи є дослідження впливу армувальних наповнювачів на фізико-механічні та вібродемпфуючі властивості поліуретанових композицій, що використовуються як захисні покриття для елементів вантажних вагонів.

Основні матеріали дослідження. У межах даного дослідження основна увага приділяється підбору та аналізу властивостей матеріалів, що використовуються для створення поліуретанових композицій з армувальними наповнювачами, здатними забезпечити ефективний вібродемпфуючий і захисний ефект при нанесенні на елементи вантажних вагонів.

Поліуретанова матриця. Поліуретан обрано як базовий полімер завдяки таким властивостям: висока еластичність і пружність; стійкість до зносу, масел, вологості й хімікатів; добрі адгезійні характеристики до сталевих і алюмінієвих поверхонь; технологічна гнучкість (можливість лиття, розпилення, нанесення пензлем або валиком).

Для дослідження використовуються одно- та двокомпонентні поліуретанові системи з різним співвідношенням ізоціанатних та поліольних груп, що дозволяє регулювати жорсткість та швидкість тверднення.

Армувальні наповнювачі. Для підвищення механічних та демпфуючих властивостей до поліуретанової матриці вводяться різні види наповнювачів:

1) Волокнисті наповнювачі: скловолокно – підвищує міцність, твердість і термостійкість; базальтове волокно – характеризується високою термостійкістю та стійкістю до агресивних середовищ; вуглецеве волокно – забезпечує легкість і високу міцність.

2) Дисперсні мікро- та нанонаповнювачі: мікродисперсний кремнезем (SiO_2) – покращує зносостійкість і вібродемпфуючі властивості; тальк і каолін – забезпечують жорсткість, знижують вартість суміші; графен або нановуглецеві трубки – зміцнюють структуру, підвищують електропровідність (опціонально).

3) Металеві порошки (Fe, Al, Cu): вводяться для підвищення тепло- та електропровідності, а також покращення демпфування при високих частотах коливань.

Висновки

1) Аналіз наукових джерел і досліджень засвідчив, що поліуретанова матриця є перспективною основою для створення захисних і вібродемпфуючих покриттів завдяки своїм еластичним, зносостійким та антикорозійним властивостям.

2) Введення армувальних наповнювачів у поліуретанову систему дозволяє суттєво покращити її експлуатаційні характеристики, зокрема: підвищити механічну міцність і твердість; покращити здатність до поглинання та розсіювання вібрацій; зменшити коефіцієнт

стирання і підвищити опір до ударних навантажень; забезпечити додатковий антикорозійний захист.

3) Оптимальними наповнювачами для підвищення функціональності поліуретанових покриттів в умовах експлуатації вантажних вагонів є: волокнисті (скловолокно, базальтове волокно); мінеральні (каолін, тальк, барит); нанонаповнювачі (нанокремнезем, графен, вуглецеві нанотрубки).

4) Композиційні поліуретанові покриття, модифіковані армувальними наповнювачами, ефективно знижують рівень вібрацій та шуму під час руху вагонів, продовжують термін служби металевих конструкцій і зменшують потребу в частому ремонті.

5) Застосування таких покриттів є технічно доцільним та економічно вигідним рішенням для підвищення надійності, безпеки та довговічності рухомого складу залізничного транспорту.

6) Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію складу наповнювачів, вивчення довгострокової поведінки покриттів у реальних умовах експлуатації та впровадження інноваційних технологій нанесення матеріалу.

Список використаних джерел

1. Прокоф'єв В. І., Грачов В. В. Полімерні композиційні матеріали для захисту металоконструкцій: властивості, технології, застосування. – Київ: Техніка, 2019. – 240 с.

2. Жарков С. І., Козлов А. В. Дослідження властивостей поліуретанових покриттів, модифікованих мінеральними наповнювачами // Матеріалознавство та обробка матеріалів. – 2020. – № 2. – С. 45–52.

3. Маслов Ю. М. Поліуретанові композиції з підвищеною зносостійкістю для транспорту // Проблеми трибології. – 2021. – № 3(105). – С. 22–28. – DOI: 10.31891/2079-1372-2021-105-3-22-28.

4. Ніколаєнко О. П., Белозьоров Д. С. Використання полімерних покриттів у вагоно- та машинобудуванні: аналіз сучасних технологій // Науковий вісник НТУ. – 2020. – № 134. – С. 102–107.

5. Zhang Y., Liu B., Wang L. Vibration damping properties of polyurethane composites reinforced with carbon nanofibers // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 140. – P. 27–34. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.047.

6. Shah D., Maiti S., Bhattacharya M. Development of hybrid polyurethane composites with enhanced mechanical and damping performance for transportation applications // Journal of Applied Polymer Science. – 2022. – Vol. 139(22). – Article ID 52039. – DOI: 10.1002/app.52039.

7. Tang X., Chen Y., Wu J. Improvement of polyurethane matrix properties by nano-fillers for anti-corrosion and anti-vibration coatings // Progress in Organic Coatings. – 2019. – Vol. 134. – P. 180–188. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.05.034.

3. ПРОЦЕСИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОБОТИЗАЦІЇ

УДК 621.7

Зорік І.В., к.т.н., доцент

i.zorik@khai.edu

Шорінов О.В., к.т.н., доцент

o.shorinov@khai.edu

Іпатов Р.С., аспірант

r.s.ipatov@khai.edu

ЩОДО ПИТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасною тенденцією в області розроблення обладнання для холодного газодинамічного напилювання (ХГН), що забезпечує розширення технологічних можливостей процесу, стабільності якості покриттів і підвищення культури виробництва, є комплексна автоматизація за рахунок використання промислових роботів і систем з числовим програмним керуванням.

Автоматизація процесу ХГН можна поділити на два напрямки:

- 1) контроль та керування тиском та температурою газу, його витратою, витратою порошку, що виконується з єдиного пульта керування;
- 2) контроль та керування взаємним переміщенням деталі та напилювача в процесі нанесення покриття – дистанції напилювання, кута, швидкості сканування тощо.

Необхідність автоматизації обумовлена, з одного боку, особливостями процесу ХГН, які пов'язані з високою чутливістю якості та товщини покриття до коливань технологічних параметрів, з іншого – вимогами техніки безпеки при експлуатації обладнання, що використовує газ з високим тиском для формування покриттів. Вибір ступеня автоматизації процесу ХГН виконують базуючись на аналізі техніко-економічних показників.

Отже, питання автоматизації є актуальним та важливим завданням забезпечення високої якості покриттів та повторюваності цих показників. Метою роботи є розроблення камери для напилювання покриттів з можливістю числового програмного керування процесом переміщення напилювача відносно поверхні для напилювання.

Використання маніпуляторів є важливим кроком у підвищенні ефективності та якості газодинамічного напилювання за рахунок забезпечення необхідної швидкості, траєкторії та положення напилювача щодо поверхні для напилювання. Це гарантує однакову якість покриттів при нанесенні на різні ділянки деталі або на різні деталі.

В промисловості, в залежності від класу деталей, що потрібно обробляти, виділяють:

- портальні маніпулятори – забезпечують переміщення напилювача за двома чи трьома координатами, часто використовуються для напилювання великих плоских поверхонь;
- спеціалізовані маніпулятори – розроблено для конкретних завдань напилювання, таких як напилювання труб або деталей складної геометрії;
- роботи-маніпулятори – шестиосьові промислові роботи, які часто використовуються для автоматизації складних процесів напилення, таких як плазмове або високошвидкісне газополуменеве напилювання (HVOF).

У більшості випадків схеми маніпуляторів для нанесення газотермічних покриттів повторюють відомі позиціонери та обертові пристрої для забезпечення зварювального виробництва [1].

Однак крім позиціонера, який має обертовий стіл та можливість нахилу столу (2 координати) задля оптимальної орієнтації зварювального пальника необхідно використовувати робота-маніпулятора, який може мати додатково керування по шести координатах. Приведена схема має безліч переваг, а також один суттєвий недолік – ціна обладнання, що не доцільно на етапі виконання лабораторних досліджень.

Проведений аналіз схем, що застосовуються, дозволяє сформулювати вимоги до маніпулятора лабораторної установки для холодного газодинамічного наплення. використання програмованих трикоординатних переміщень і четвертої координати для поворотного столу; простота конструкції із використанням стандартних комплектуючих; можливість підготовки поверхні перед напилюванням піскоструминною обробкою; нанесення покриттів як у ручному, так і автоматичному режимах. Виходячи з вимог виникає необхідність створення камери де буде агрегатоване та розміщене обладнання для позиціонування деталі та напилювача для нанесення покриттів.

Розглянемо деякі використані інженерні рішення для забезпечення переміщень по трьох осях та застосування поворотного столу (рис. 1).

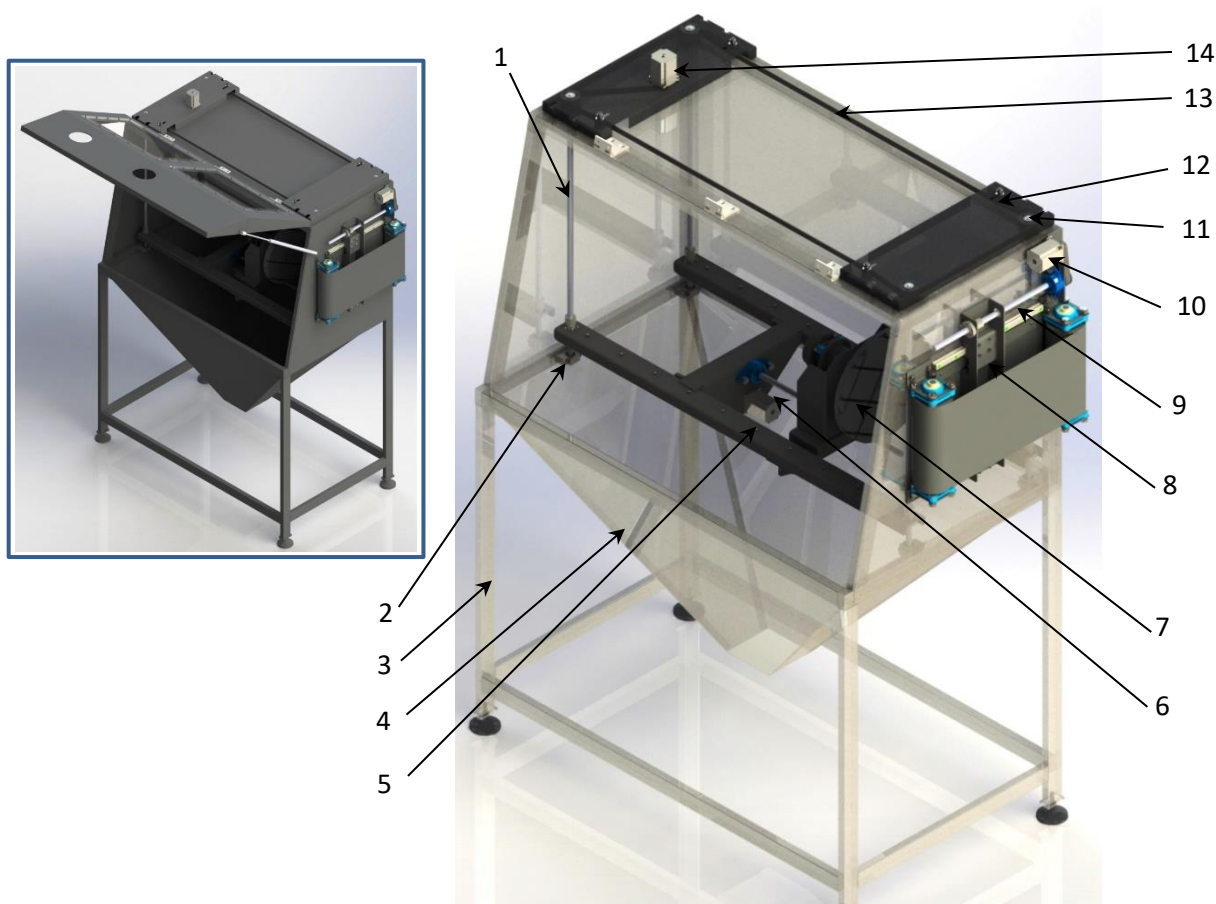


Рис. 1. Зовнішній вигляд і кінематика спроектованої камери для нанесення покриттів

103

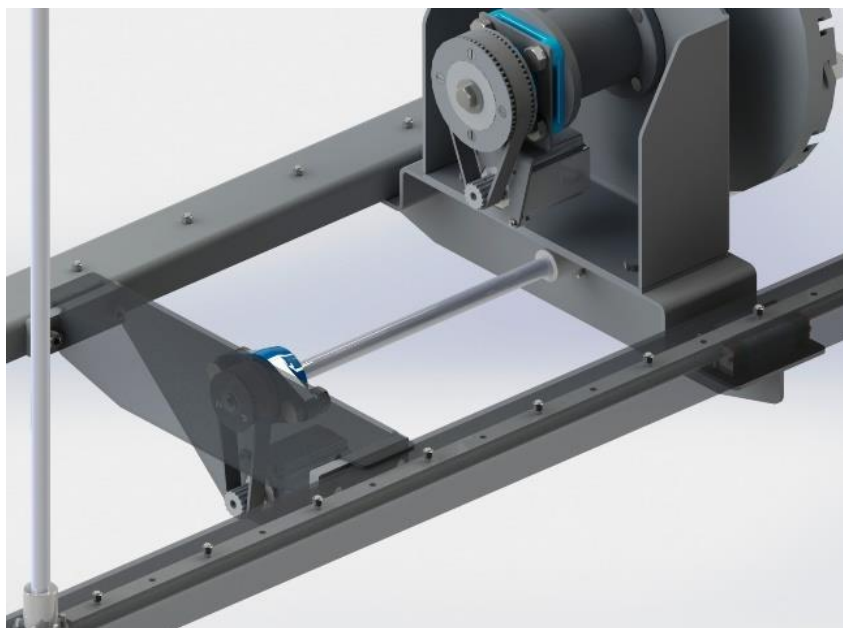
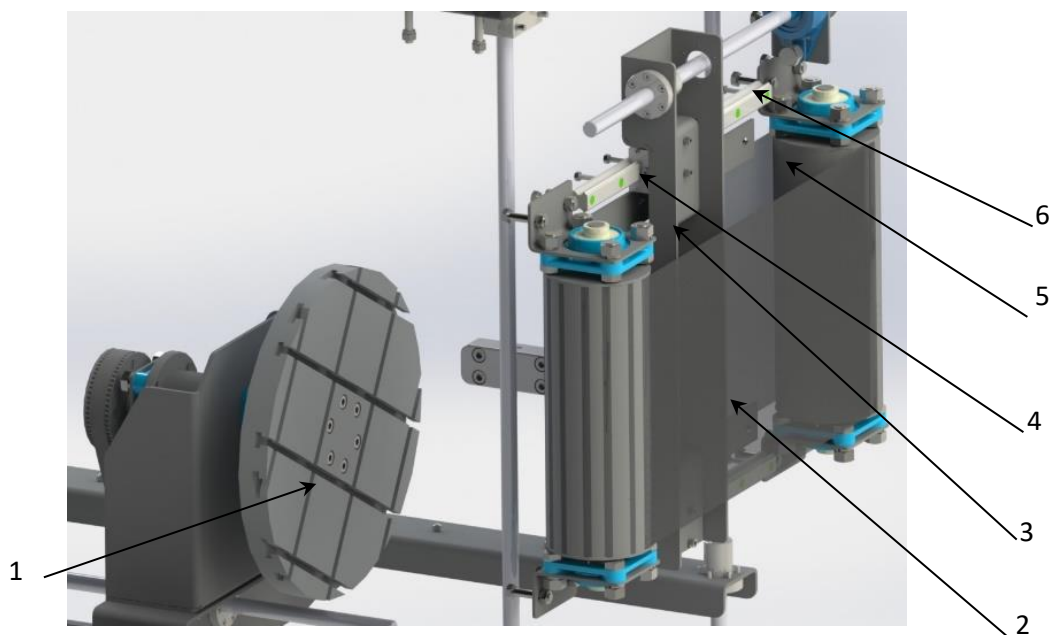


Рис. 2. Реалізація руху по вісі X

Для забезпечення жорсткості при переміщенні по подачах по вісям X та Y встановленні каретки на рельсових напрямних HGH20CA, які в свою чергу закріплені на гнучому швелері (рис. 2). Задля спрощення підводу робочого газу до напилювача, який знаходиться всередині камери та закріплено на траверсі, переміщення по координати Y реалізовано таким чином, що підводи йдуть зовні, а розділення між камерою та атмосферою йде за рахунок рухомої шторки, яка опирається на ролики та закріплена до траверси (рис. 3). Обертовий стіл програмований, дозволяє орієнтувати деталь безпосередньо в процесі нанесення покриттів, також може не задіюватись при нанесенні покриттів на плоскі деталі. Підшипникові опори на всіх елементах використовуються покупні, що спрощує конструкцію та знижує собівартість виробу.



1 – обертовий стіл (позиціонер); 2 – шторка; 3 – траверса вісі Y; 4 – каретка; 5 – ролик шторки; 6 – напрямна

Рис. 3. Реалізація руху по вісі Y

Для керування переміщеннями маніпулятора використовується контролер числового програмного керування на 4 осі RMHV3.1, або аналог. Задля отримання керуючих програм можна задіяти SolidCam, розробивши свій пост-процесор, або адаптувати існуючі пост-процесори.

Висновки. За результатами виконаної роботи було отримано комплект конструкторської документації на виготовлення запропонованої камери для ХГН покриттів з числовим програмним керуванням.

Список використаних джерел

1. Промислові роботи KUKA. <https://www.techvitas.com.ua/ua/PROMISLOV%D1%96-ROBOTI/> (Last accessed: 07.07.2025).
2. Li, W., Yao, Y., Wu, H., Liao, H., Costil, S. & Deng, S. Spray Trajectory Planning for Complex Structural Components in Robotized Cold Spray Additive Manufacturing. Journal of Thermal Spray Technology, 2023, vol. 33, pp. 71–87. DOI: [10.1007/s11666-023-01696-x](https://doi.org/10.1007/s11666-023-01696-x)
3. Lewke, M., Wu, H., Gehlhoff, F., List, A., Gärtner, F., Klassen, T. & Fay, A. Automation of a Repair Process by Robot-Guided Cold Spray. Journal of Thermal Spray Technology, 2025, vol. 34, pp. 1545–1565. DOI: [10.1007/s11666-025-01973-x](https://doi.org/10.1007/s11666-025-01973-x)

ВИКОРИСТАННЯ ДВОЗАХВАТНИХ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ НА ПОЗИЦІЯХ ДОПОМІЖНИХ ПРИСТРОЇВ

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Впровадження автоматизованих роботизованих систем у виробничі процеси вимагає інтеграції технологічного обладнання, промислових роботів та допоміжних пристроїв. Продуктивність та гнучкість таких систем є ключовими показниками їхньої ефективності. При цьому продуктивність роботизованих технологічних комплексів (РТК) напряму залежить від оптимізованої роботи всіх компонентів, зокрема, від ефективності функціонування промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв.

У роботі [1] представлено різні конструкції допоміжних пристроїв та наведені оцінки продуктивності РТК. Однак, ця робота не містить аналізу продуктивності роботи промислового робота на позиціях подавальних чи приймальних пристроїв. Такий аналіз є важливим, особливо коли стоїть питання вибору між однозахватними та двозахватними роботами.

Дана робота присвячена аналізу особливостей конструктивних виконань допоміжних пристроїв (рис. 1). Також проведено дослідження часу, що витрачається двозахватним роботом на обслуговування таких пристроїв.

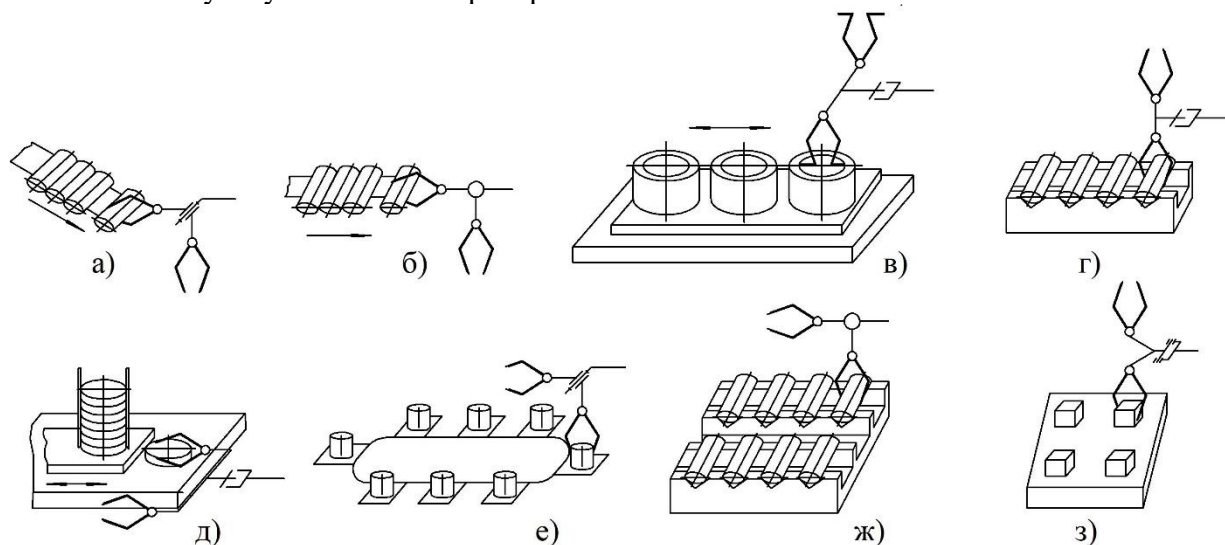


Рис.1. Виконання допоміжних пристроїв і варіанти їх обслуговування

Допоміжні пристрої можуть мати різні конструктивні виконання, що визначаються габаритними розмірами і формою деталей, з якими вони працюють, компоувальною схемою РТК тощо. Узагальнена класифікація допоміжних пристроїв наведена на рис. 2.

Допоміжні пристрої в складі комплексів можуть виконувати роль подавальних, приймальних та подавально-приймальних пристроїв. Стосовно можливості руху деталей в них, пристрої можна розділити на рухомі в яких деталі виходять на позиції за допомогою рухів, що забезпечуються допоміжним пристроєм, наведені на рис. 1, а-в. В нерухомих пристроях (рис. 1, г, ж, з) деталі є нерухомими, а позиціонування відбувається за рахунок рухів робота. Рухомі пристрої розділяються на лінійні (рис. 1, а-в) та обертові (рис. 1, е). Також допоміжні пристрої різняться по джерелу реалізації руху. Деталі можуть рухатися за допомогою гравітаційних сил (рис. 1, а), індивідуального привіду (рис. 1, г, ж, з) тощо. У

випадку індивідуального приводу, він може бути електричний, пневматичний чи гідравлічний. По позиціях з якими працює промисловий робот допоміжні пристрої можна поділити на однопозиційні (рис. 1, а, б, д, е) та багатопозиційні (рис. 1, г, ж, з). Багатопозиційні пристрої можна розділити на однокоординатні (рис. 1, г), двокоординатні (рис. 1, ж, з) і трикоординатні [2].

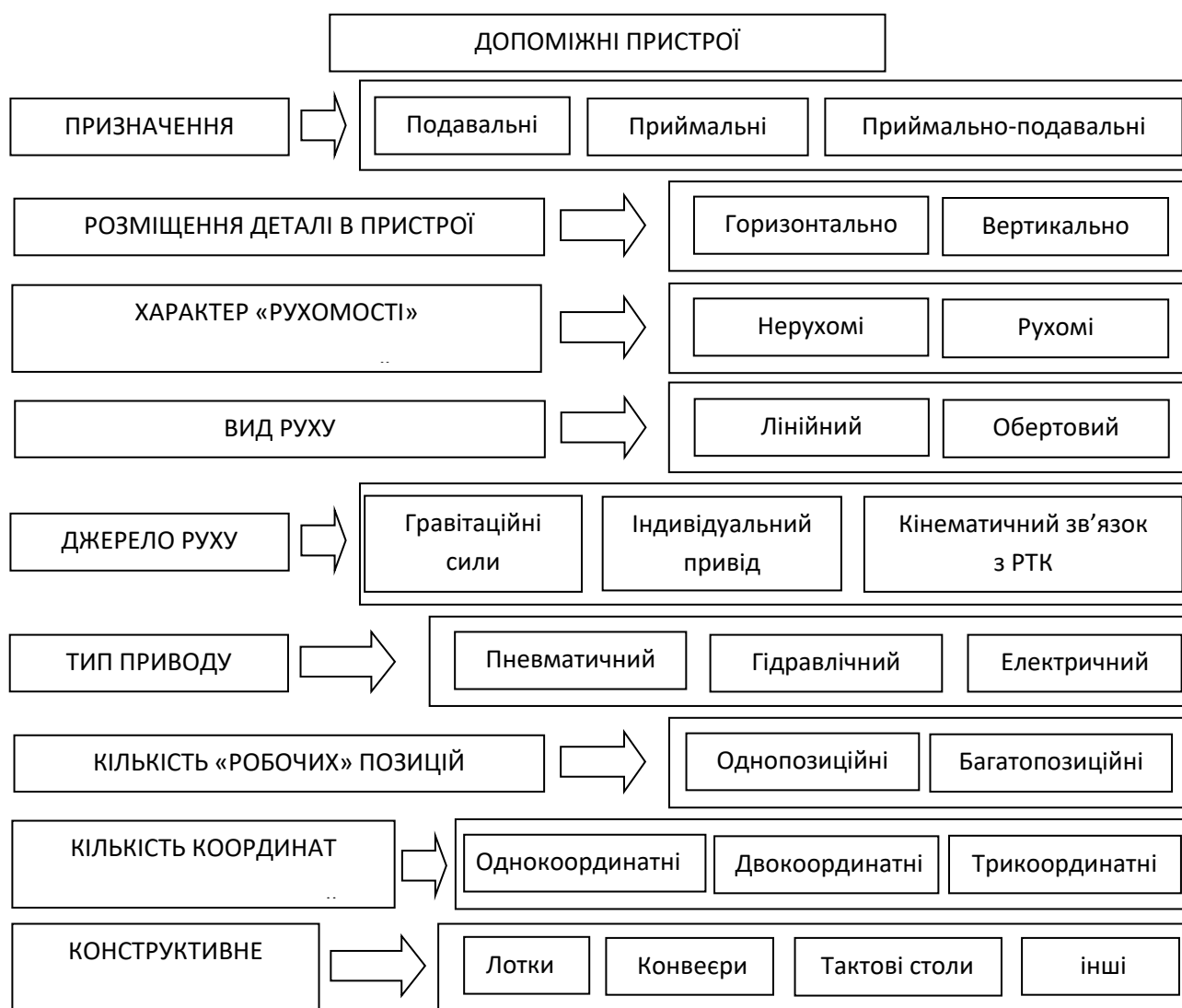


Рис. 2. Класифікаційні ознаки виконання допоміжних пристроїв

Метод подачі заготовок визначається конструктивним виконанням допоміжних пристроїв. Для валів такі пристрої виконуються у вигляді похилого лотка (рис. 1, а). Використовуються конвеєри, транспортери тощо (рис. 1, б). Використання пристрою, який встановлено на тактовому столі (рис. 1, в) забезпечує поштучну подачу деталей на певну позицію. При подачі деталей типу диски чи кільця, може бути використано їх відсікання від “пакету” деталей (рис. 1, д). Також можливе використання поворотних конвеєрів (рис. 1, е). Використання таких схем допоміжних пристроїв дозволяє знизити функціональні показники промислових роботів через можливість захвату заготовок з визначеної точки. Пристрої касетного типу (рис. 1, г, ж, з), потребують, аби промисловий робот здійснював підхід на відповідних позицій пристрою.

Особливості виконання захватних пристроїв роботів, також мають вагомий вплив на питання продуктивності обслуговування допоміжних пристроїв. На рис. 3 розглянуто варіанти виконання двозахватних промислових роботів.

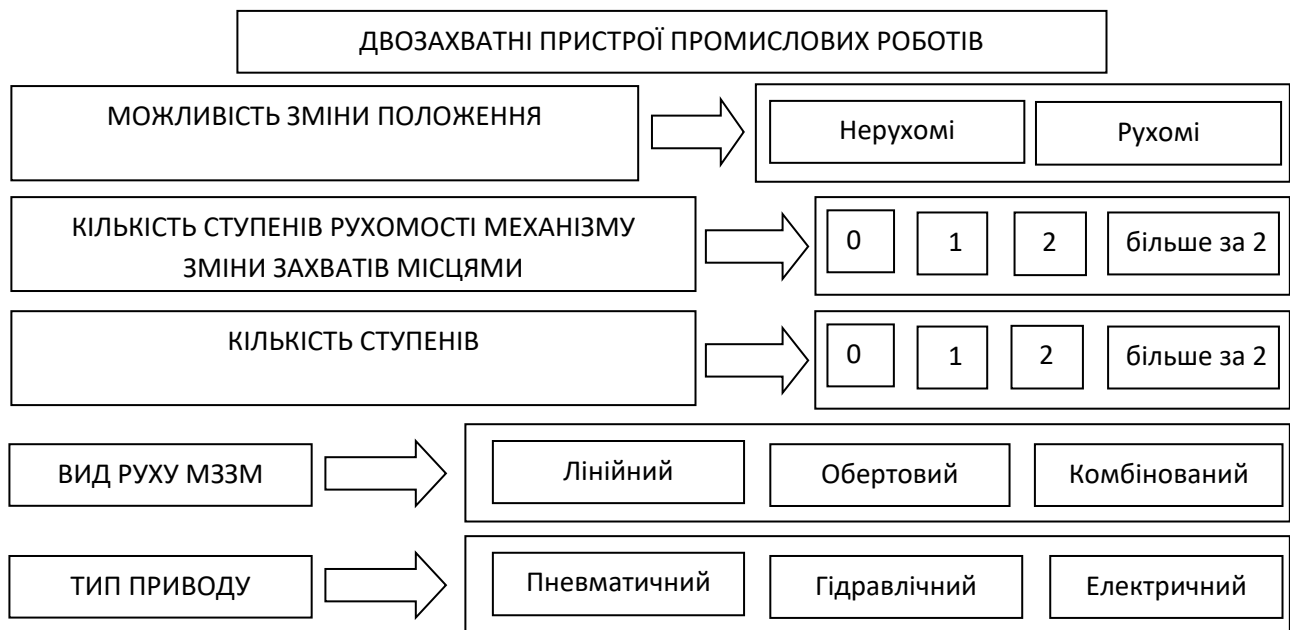


Рис. 3. Конструктивні особливості двозахватний промислових роботів

Тож, проаналізувавши конструктивні особливості виконання допоміжних пристроїв та двозахватний пристроїв промислових роботів можна викласти, в загальному виді, структуру часу обслуговування допоміжних пристроїв промисловим роботом. Її можна представити як суму часу, що витрачається на затиск (розтиск) деталі; час на підведення (відведення) захватного пристрою; час на ротацію захватів; час на локальні переміщення в межах зони допоміжних пристроїв; час на зміну позиції допоміжного пристрою; час на переміщення робота між пристроями (коли окремо приймальний і подавальний пристрій). Ступінь перекриття цього часу, залежить від конструктивного виконання певного допоміжного пристрою та конструкції захвату [2, 3].

Отже функціонування промислового робота на позиціях допоміжних пристроїв, суттєво залежить від виконання захвату робота, особливо при використанні двозахватних конструкцій [4].

В цілому, розглянута структура дозволяє аналізувати продуктивність РТК, що містять різні виконання допоміжних пристроїв та двозахватні промислові роботи різних конструкцій. Це дає можливість визначення найбільш доцільних варіантів конструктивного виконання як роботів, так і допоміжних пристроїв для конкретних деталей та РТК.

Список використаних джерел

1. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.
2. Павленко І.І., Мажара В.А. Продуктивність функціонування двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. – Вип. 30 – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 170 – 175.
3. Павленко І.І., Мажара В.А. Структура продуктивності верстатних роботизованих комплексів // Збірник наукових праць. – Вип. 17 Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 131 – 137.
4. Павленко І.І., Мажара В.А. Дослідження впливу використання двозахватних пристроїв на продуктивність роботи РТК // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе. В 5-ти томах. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. Т.5 – С. 282 – 287.

ОГЛЯД МЕТОДУ ДЕТАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Система тягового електроприводу є єдиним джерелом живлення електропоїздів, а її споживання енергії становить близько 40 – 50% від загального споживання енергії залізничним транспортом [1]. Системи тягового приводу з постійними магнітами (PMTDS) стали ключовим напрямком розвитку систем тягового приводу залізничного транспорту наступного покоління [2] завдяки своїм перевагам низьких втрат та високої ефективності [1]. Однак PMTDS є складною системою високого порядку з багатовимірним зв'язком машинної електрики та теплового магнетизму. Отже, вона також стала основним джерелом несправностей зі збільшенням часу служби.

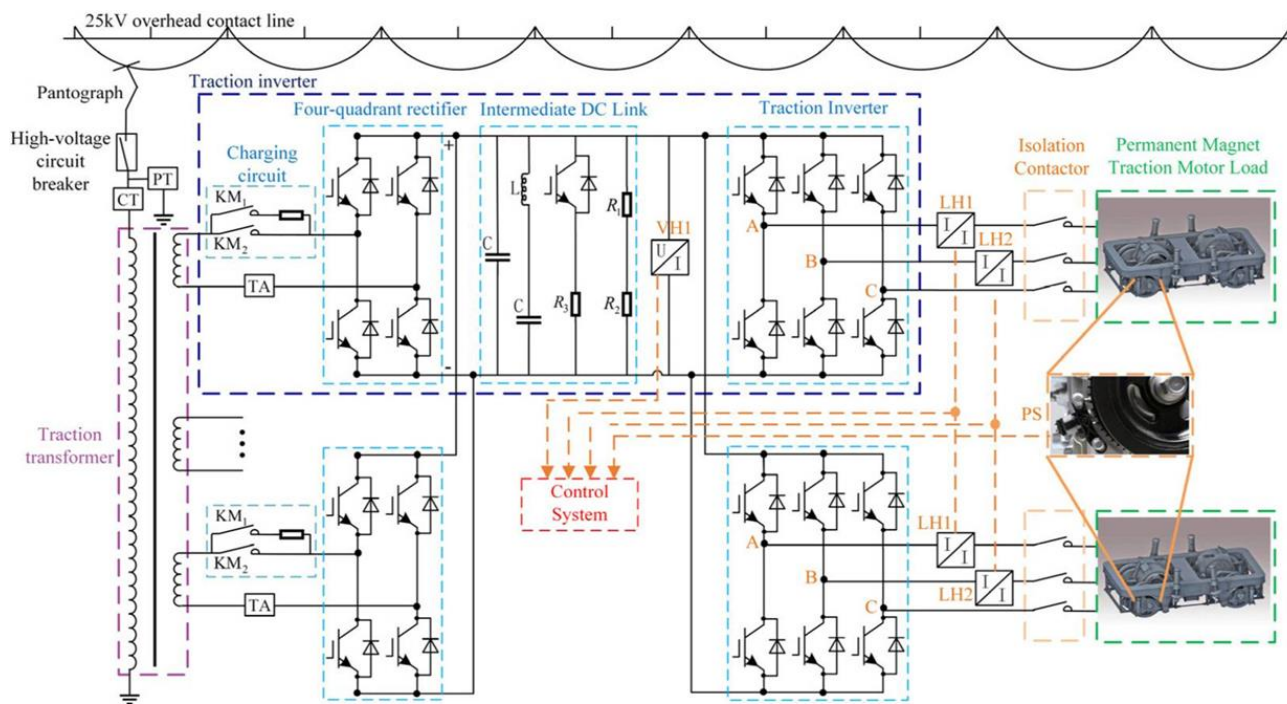


Рис. 1. Принципова схема основного кола типового тягового приводу з постійними магнітами (PMTDS)

Як показано на рис. 1, для реалізації високопродуктивного замкнутого керування тяговим двигуном з постійними магнітами в PMTDS встановлено три види датчиків для вимірювання струмів фаз U та V, проміжної напруги постійного струму та сигналу положення ротора двигуна [4]. Датчики в системі тягового приводу схильні до несправностей через механічну вібрацію, гарячі та вологі умови, а також сильні електромагнітні перешкоди [5].

При дослідженні несправностей спільного використання багатовимірних датчиків у режимі реального часу на основі методу структурного аналізу, з повним використанням проміжної постійної напруги, струмів двигунів фаз A та B, а також інформації про положення

ротора, зібраної за допомогою замкнутого циклу керування PMTDS. Основні внески полягають у наступному: запропоновано метод спільної діагностики несправностей у реальному часі датчика проміжної постійної напруги, датчиків струму фаз А та В, а також датчика положення в PMTDS; запропоновано метод перевірки тестового алгоритму діагностики, заснований на записі даних, для відтворення реальних сценаріїв несправностей, а також побудовано відповідну тестову платформу для перевірки ефективності запропонованого методу діагностики.

Несправності датчиків є одними з найпоширеніших несправностей, що призводять до погіршення продуктивності або функціональної втрати в системах тягового приводу з постійними магнітами (PMTDS). Для швидкої діагностики несправних датчиків у дослідженні пропонується метод спільної діагностики несправностей кількох датчиків у реальному часі на основі структурного аналізу. Результати платформи фізичного тестування на основі онлайн-записів даних про несправності показали, що запропонований метод може забезпечити швидке виявлення несправностей та їх локалізацію кількох датчиків у PMTDS та має гарну прикладну цінність.

Список використаних джерел

1. Zhang, J.M.; Su, H.; Ren, Q.; Li, W.; Zhou, H.C. Review on development and key technologies of permanent magnet synchronous traction system for rail transit. *J. Traffic Transp. Eng.* 2021, 21, 63–77.
2. Feng, J.H. Study on the permanent magnet synchronous motor drive system of rolling stock. *Electr. Drive Locomot.* 2010, 5, 15–21.
3. Ni, Q.; Li, X.M.; Liu, K. Time-series Pattern Recognition Based Fault Diagnosis of Line-side Over-current. *Proc. CSEE* 2022, 42, 3963–3974.
4. Fu, X.H.; Gu, S.D.; Xiong, J.X. Review of dq Axis Current Decoupling Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor. *Proc. CSEE* 2022, 42, 1–19.
5. Wu, C.; Guo, C.; Xie, Z.; Ni, F.; Liu, H. A Signal-Based Fault Detection and Tolerance Control Method of Current Sensor for PMSM Drive. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 9646–9657.

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ВИРОБІВ ПРИ ОТРИМАННІ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Контроль температури поверхні виробів при отриманні вакуумно-дугових покриттів на деталях машин та обробному інструменті у різних галузях промисловості є необхідним процесом, якій дозволяє забезпечити якість покриттів і їх працездатність. Найбільш перспективним методом вимірювання температури поверхні в вакуумно-дугових технологіях, де зазвичай здійснюється обертання виробів, є пірометричний метод. Однак в умовах, коли в процесі нанесення покриттів йде постійне запилення вхідного вікна оптичної системи пірометра, точність вимірювання різко падає. Відомі заходи щодо захисту від конденсації на вікні частинок плазми вакуумної дуги, як правило, дозволяють лише частково вирішити це завдання [1]. Для вирішення цієї проблеми була розроблена система вимірювання температури поверхні виробів у вакуумно-дугових процесах нанесення покриттів пірометричним методом, принцип дії якої забезпечує повну відсутність потрапляння продуктів ерозії катода на вікно виведення інфрачервоного випромінювання на вимірювальний датчик пірометра, структурна схема якої зображена на рис. 1. Ця система була розроблена на основі установки «Булат-6».

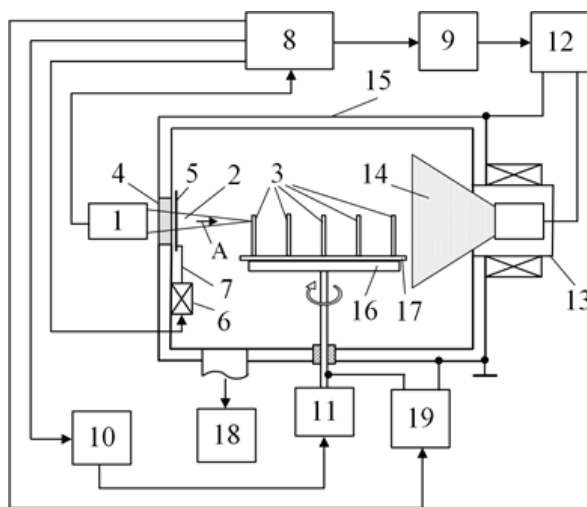


Рис.1. Структурна схема системи для вимірювання температури поверхні виробів при отриманні вакуумно-дугових покриттів: 1 – пірометр; 2 – інфрачервоне випромінювання; 3 – вироби; 4 – вікно виведення випромінювання; 5 – заслінка-екран; 6 – електромагніт; 7 – тяга; 8 – блок керування; 9 – блок збудження-гасіння вакуумної дуги; 10 – контролер крокового приводу; 11 – кроковий привід; 12 – блок живлення джерела плазми; 13 – джерело плазми; 14 – плазмовий потік; 15 – вакуумна камера; 16 – планетарний механізм; 17 – тримач підкладки; 18 – система відкачування; 19 – джерело напруги зміщення

Безпосередньо до системи вимірювання температури поверхні оброблюваних виробів відносяться такі елементи: пірометр 1 типу OPTRIS CTlaser LT серії CF2 optics 75:1, датчик якого приймає інфрачервоне випромінювання 2 від виробу 3, на шляху якого розташовані заслінка-екран 5, що відкривається за допомогою електромагніту 6 і тяги 7, вхідне вікно 4 і блок керування 8, на вхід якого поступає сигнал о величині температури виробу з пірометра.

Решта елементів, зображених на рис. 1, призначені для здійснення осадження іонно-плазмовим методом покриттів на оброблювані вироби [2].

Працює ця система вимірювання наступним чином. Блок керування по алгоритму, закладеному до нього, забезпечує процес вимірювання температури виробів на різних етапах осадження на них покриттів, керуючи своїми вихідними сигналами роботою інших блоків. Перед вимірюванням температури виробів за допомогою системи збудження-гасіння вакуумної дуги 9 вимикається блок живлення 12 джерела плазми 13, що зупиняє формування плазмового потоку 14. Одночасно припиняється обертання розробленого планетарного механізму 16 з тримачем підкладки 17, на якому закріплені вироби, що забезпечує розташування виробу-зразку, температура поверхні якого буде вимірюватись, саме в точці вимірювання, як зображено на рис. 1 і 2. Для забезпечення вимірювання температури виробів точно у точці вимірювання застосовувався спеціально розрахований і виготовлений планетарний механізм, в якому сателіти обертаються цілу кількість обертів при одному повному оберті цього механізму [3]. Після цього із затримкою декілька мілісекунд відкривається заслінка-екран (цей час затримки забезпечує повне зникнення частинок плазми у робочому об'ємі вакуумної камери), проводиться вимірювання температури виробу-зразку, закривається заслінка-екран і процес нанесення покриттів продовжується до наступного часу вимірювання температури.

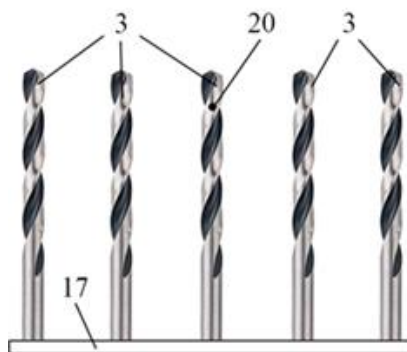


Рис. 2. Місто розташування вимірювального кола пірометра на поверхні оброблюваного виробу при його знаходженні в точці вимірювання температури (вид А, рис. 1.): 20 – місто розташування вимірювального кола пірометра на поверхні оброблюваного виробу при його знаходженні в точці вимірювання температури, інші позиції як на рис. 1.

За результатами, отриманими при вимірюванні температури виробів, блок керування видає відповідний управляючий сигнал на джерело напруги зміщення 19, яке збільшує або зменшує напругу, що подається на оброблювані вироби. Таким чином здійснюється моніторинг температури виробів в процесі отримання покриттів як в режимі іонного очищення, так і в режимі безпосереднього нанесення покриття, який дозволяє шляхом підвищення або зменшення напруги, що подається на вироби, підтримувати температуру виробів на рівні, необхідному для отримання високоякісних покриттів.

Список використаних джерел

1. Сисоєв, Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : монографія / Ю. О. Сисоєв. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.
- 2.. Sysoiev, Iu. System for measurement the product surface temperature for vacuum-arc coatings / Iu. Sysoiev, Yu. Shyrokyi, K. Fesenko / Problems of Atomic Science and Technology. 2025. №2(156), p. 171-176.
3. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин: підручник / Я.Т. Кіницький. – К. : Видавництво “Наукова думка”, 2002. 660 с.

4. ФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

УДК 004.942

Єлізева А.В., к.т.н., доцент
a.elizeva@khai.edu

БАГАТОКРИТЕРІЙНИЙ МЕТОД ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Однією із задач управління логістичним ланцюгом передбачає організацію ефективної схеми постачань, яка б забезпечувала її надійність, вчасність та безпечність. В умовах воєнного стану Україна стикається з великою кількістю проблем через часткову руйнацію транспортної інфраструктури, що призводить до появи неоптимальних маршрутів, підвищення вартості та збільшення часу перевезень [1]. Таким чином, актуальною є задача розробки методу пошуку маршрутів перевезень з можливістю побудови варіантів транспортування з урахуванням критеріїв оптимальності. Аналіз сучасної літератури показав, що питанням формування стратегій управління ланцюгами поставок та оцінці ризиків та загроз транспортування приділено достатньо уваги. Проте відсутні моделі, що дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо вибору оптимального варіанту перевезення [2–4]. Тому доцільним є розробка метода, що дозволить обирати оптимальні маршрути перевезень на основі багатокритеріальної оцінки варіантів. Транспортна мережа країни може бути подана у виді орієнтованого зваженого мультиграфа [5]. Розроблений метод ґрунтується на удосконаленні алгоритму Дейкстри для пошуку найкоротших маршрутів з урахуванням функції корисності на ребрах графа. Функція корисності враховує такі критерії оцінки, як відстань та вартість перевезення, безпечність транспортування, стан дороги. Різномірні критерії мають бути нормалізовані, а їх важливість є експертною оцінкою, яка може змінюватися в залежності від обставин. Слід зазначити, що деякі ділянки маршруту можуть бути включені за замовчуванням, оскільки є обов'язковими пунктами перевезень (наприклад, транспортні хаби). Запропонований метод може бути використаний при плануванні логістичних ланцюгів для транспортування вантажів або при реструктуризації існуючих, що дозволяє проводити обґрунтований вибір варіантів перевезень.

Список використаних джерел

1. Шмиглюк, Є.Г. Проблеми та перспективи розвитку транспортної логістики підприємств в сучасних умовах / Є.Г. Шмиглюк, З.В. Григорова // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи». Секція 4. Управління ланцюгами поставок у стратегії розвитку підприємств. – 2023. – С. 180 – 181.
2. Іванов, Ю.В. Логістика в сучасних умовах розвитку України / Ю.В. Іванов, Д.Р. Нагай, Т.Д. Сохань // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. – 2025. – № 36 (75). – С. 72 – 77. DOI: <https://doi.org/10.32782/2523-4803/75-1-11>.
3. Військова логістика [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://gmk.center/posts/voennaya-logistika-problemy-ukrainskogo-eksporta-ostajutsya-nereshennymi/>
4. Бездітко, О. Стратегія формування і управління логістичними ланцюгами поставок на підприємстві / О. Бездітко, І. Кравчук, С. Лавриненко // Сталий розвиток економіки. – 2024. – № 2 (49). – С. 252 – 257. DOI: doi.org/10.32782/2308-1988/2024-49-40.
5. Слюсар, В.І. Удосконалений метод алгоритму Дейкстри для визначення найкоротших маршрутів між вузлами зв'язку у системі Логістика в сучасних умовах розвитку України / В.І. Слюсар, К.А. Громяк // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2023. – № 1 (46). – С. 5 – 12. DOI: [10.33099/2311-7249/2023-46-1-5-12](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-46-1-5-12).

АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ В УМОВАХ ВИСОКОЇ ВОЛАТИЛЬНОСТІ РИНКІВ ТА РУЙНІВНИХ ІННОВАЦІЙ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

В умовах сучасної економіки виробничі підприємства стикаються з необхідністю постійного підвищення конкурентоспроможності. Одним із ключових факторів успіху в цьому напрямку стає ефективна організація логістики виробництва. Виробничі галузі сьогодні стикаються з серйозними викликами. Ключовими серед них є висока волатильність ринків та руйнівні інновації.

Висока волатильність ринків означає часті та непередбачувані коливання попиту, цін, уподобань клієнтів та інших ключових показників. Наприклад, різкий зріст попиту на продукт в одному кварталі може змінитися його падінням у наступному через економічні, політичні чи технологічні зміни. Така нестабільність ускладнює довгострокове планування виробництва, закупівель та розподілу ресурсів.

Руйнівні інновації, своєю чергою, є технологічними або організаційними нововведеннями, які кардинально змінюють існуючі ринки та бізнес-моделі. Вони часто приходять із простими, дешевими або більш зручними рішеннями, які спочатку ігноруються традиційними гравцями, але згодом повністю витісняють їх. Прикладами таких інновацій є смартфони, що замінили безліч пристроїв, онлайн-навчання замість традиційних курсів або цифрові платформи на кшталт Uber та Netflix, які зруйнували класичні галузі. Ці інновації вимагають від підприємств швидкої трансформації: перегляду своєї продукції, процесів і стратегій.

Ці та інші проблеми потребують своєчасного вирішення для збереження позицій на ринку. Різні підходи до задоволення ринкових потреб призвели до того, що сучасне виробниче середовище характеризується постійним зростанням складності виробничих систем. Досягнення виробничих цілей при збереженні високої ефективності стає можливим лише за правильної налаштування та конфігурації систем планування та управління виробництвом (PPC – Production Planning and Control). Хоча для вирішення виникаючих проблем все активніше застосовуються інформаційні технології, однією з найважливіших задач і досі залишається вибір відповідної стратегії організації виробництва. При цьому універсальних рішень не існує: більшість виробничих конфігурацій формуються на основі індивідуальних вимог клієнтів та специфіки бізнесу. Це свідчить про те, що стандартних «найкращих практик» у цій сфері просто немає.

У прагненні забезпечити необхідну гнучкість і підвищити якість продукції компанії по всьому світу починають впроваджувати різноманітні технології та стратегії виробництва, адаптовані під конкретні умови. Незважаючи на масштабні наукові дослідження в галузі управління виробництвом, питання вибору та комбінування ефективних стратегій управління виробничими процесами (PMCS – Production and Manufacturing Control Strategies) залишається значною мірою недостатньо вивченим.

У цій роботі розглядається застосовність різних стратегій PMCS залежно від їх ключових характеристик. Запропоновано підхід, за яким виробничі системи поділяються на більш дрібні елементи — сегменти, які аналізуються з урахуванням таких параметрів:

- виробничі властивості, пов'язані з об'єктом;
- властивості, визначені структурою виробничого процесу;
- рівень складності організації виробництва;
- ступінь автоматизації виробничої системи.

Оцінка цих характеристик дозволяє вибрати найбільш відповідні стратегії управління для кожного сегмента, а отже — і для всієї виробничої лінії в цілому.

ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ПОКАЗНИКІВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Усі сучасні транспортні системи (ТС) об'єднані у своїх функціональних призначеннях та необхідності підвищення ефективності функціонування в конкретних умовах. Багато в чому вони відрізняються способами функціонування в конкретному середовищі своєї структури та складом, а також якістю функціонування. Їх якість визначається численними властивостями (простими та складними). Різноманітність цих властивостей може бути структурована. Завдяки функціонуванню великої (основних, об'єднаної) ТС можна розрізнити підсистеми – технологічну (машину) та систему взаємодії «людина – машина навколишнє середовищем». Групові властивості цих підсистем значною мірою збігаються. Можна розрізнити наступні властивості: призначення, надійність, безпеки, екологічності, ергономічності, технологічності та інші.

Далі, для стислості ми обмежуємося розглядом властивостей груп технологічності та ергономічності. Підкреслюємо, що для усіх окремих властивостей, які входять у групові властивості, необхідно визначити кількісні показники якості та поєднати певним методом у групові кількісні показники.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування транспортного засобу за допомогою всебічної кількісної оцінки його якості. Для кількісної оцінки необхідне суворе визначення якості та її показника.

У світовій практиці подібних операцій визнані метод кваліметрії [1]. Оцінка якості функціонування різних ТС та визначення показників їх якості присвячено досить великій склад робіт, наприклад, [2-4]. Деякі методи формування кількісного показника якості викладені в роботі [5]. У європейській практиці були прийняті нормалізовані вимоги до якості теплового комфорту, як показника якості [6]. Автори в роботі [7] намагалися визначити мірність і показника «комфортність», розглядаючи його як певні витрати енергії.

Тема цієї роботи є невід'ємною частиною Держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження теорії функціонування міських пасажирських транспортних систем» Д/Р 0124U000852.

Вищезазначене вказує на актуальність розглянутої теми.

Технологічність ТС розглядається як властивість, яка дозволяє ТС функціонувати з мінімальними термінами та витратами на підготовку процесу в певному місці та ситуації, максимальної економічної ефективності при високій якості, а також реструктуризації з мінімальними умовами та витратами при зміні навколишнього середовища та обставин. До числа підвластивостей групового характеру якості «технологічність» включають властивість транспортної гнучкості.

Загалом, гнучкість стану системи полягає у її здатності добре функціонувати при різних зовнішніх та внутрішніх змінах. Для виробництва що розглядається, зовнішні зміни пов'язані з потребою постійного, часто важко передбаченого змінення асортименту виробів, використанням більш прогресивних технологій та іншими факторами. Внутрішні зміни або неполадки визначаються наявністю збоїв у системі управління технологічною системою, фінансовими та матеріальними потоками, відхиленнями у часу обробки та іншими факторами внутрішнього виробничого характеру.

Гнучкий стан системи визначається сукупністю всіх аспектів виробничої-господарської діяльності підприємства: технологією, характером обладнання, ТС, організаційними

особливостями та іншими аспекти виробничого процесу.

Для того, щоб мати можливість оцінити ступінь гнучкості ТС, проводити порівняльний аналіз та здійснювати їх оптимізацію за критерієм гнучкості, необхідно розробити такий інтегральний показник, який би відображав функціонально-технологічні можливості систем, був порівняльним для різних типів виробництв, зручним для використання тощо.

Е. С. Пуховський [5] пропонує ступінь гнучкості визначати за кількістю різних функціональних станів n , котрі гнучка виробнича система може дискретно приймати в межах своїх технічних можливостей, і часом переходу n від одного функціонального стану i до другого j . Тоді у якості першого компонент показника ступеня гнучкості, ви можете прийняти

$$g_1 = (1 - 1/n). \quad (1)$$

Час T переходу від одного стану до іншого визначається як сума часу кожного переходу:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tau_{ij}. \quad (2)$$

Другим складовим показником гнучкості пропонується визначати як відношення T допланового періоду часу T_{nl} , що прийнятий за базовий під час атестації та порівняльний оцінки будь-якої виробничої системи, наприклад, діючий фонд часу такої системи за певний проміжок часу:

$$g_2 = \left(1 - \frac{1}{T_{nl}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tau_{ij} \right). \quad (3)$$

Інтегральний показник часу визначається як:

$$G = g_1 g_2. \quad (4)$$

Значення цього показника полягає в наступному: чим менше час переходу від одного стану до іншого та менше кількість таких переходів, тим виробництво більше гнучкіше. Чим більша кількість функціональних станів, що сприйняті системою, тим система гнучкіша. Множення двох показників, що діють в одному напрямку (підвищена гнучкість) дає результат, що діє в одному напрямку – збільшення гнучкості системи. Числове значення інтегрального індикатора не може бути більше 1,0.

На думку авторів, такий підхід є досить адекватним, але складним для всебічної оцінки якості. Для комплексного оцінювання якості можна використовувати коефіцієнт оновлення (підготовки) та прийняття до функціонування нового елемента, наприклад, нової автоматизованої підсистеми управління T_0 , до часу функціонування цього елемента в системі:

$$k = T_0 / T_\phi.$$

Час функціонування T_ϕ – зовнішній фактор гнучкості, який визначає цикл активності, що змінюється за часом, як цикл фаз народження: зростання, зрілості та падіння та відповідний до необхідних кожному періоді розвитку параметрами за часом.

Параметр якості у вигляді його запису в цій роботі є мінімізуючим. Це потрібно враховувати при формуванні всебічного показника якості ТС.

Збільшення гнучкості ТС відбувається шляхом зменшення складності освоєння функціонування елементів системи через здобуття стабільних навичок персоналом та організаційно-технічного налагодження функціонування.

Але на гнучкість значною мірою впливає і фінансова економічна сторона діяльності. Інвестування в нові передові технології, оснащення виробництва сучасним технологічним

обладнанням суттєво впливає на гнучкість виробничих та технологічних систем.

Зростання ролі власного прибутку, що направляється на оновлення виробничих фондів, вироблених послуг, інвестиційну політику, підвищує гнучкість виробництва. Більше того, цей вплив тим більший, чим більша питома вага цих коштів порівняно з власними активами підприємства. Залучення фінансових важелів у вигляді позик, бюджетного фінансування, що спрямоване на виробництво певного виду продукту, дозволяє збільшити гнучкість виробничих та технологічних систем.

Для конкретних розрахунків необхідно залучити власні та зовнішні бази статистичних даних.

Можна встановити математичні залежності, що з'єднують параметри уніфікації та технологічності ТС з параметром, який визначає гнучкість функціонування багатьох технічних систем.

Список використаних джерел

1. Azgaldov, Garry G. (2015). The ABC of Qualimetry Toolkit for measuring the immeasurable. ISBN 978-5-4474-2248-6.
http://www.labrate.ru/kostin/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-CC-BY-SA.pdf
2. Никончук, В. М. (2022) Дослідження системи транспортного обслуговування пасажирів за показниками якості / В. М. Никончук // Кропивницький : Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. 5 (36), Ч.2, – С. 246–253.
[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.246-253](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.246-253).
<https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/127522>.
3. Ільченко, В. Ю. (2019). Підходи до оцінювання якості міських пасажирських перевезень автомобільним транспортом / В. Ю. Ільченко, С. І. Петровська // Східна Європа: економіка, бізнес та управління, № 3(20), – С. 219–226.
https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/35.pdf.3.
4. Любий, Є. В. (2019). Дослідження якості обслуговування пасажирів на автобусному маршруті № 240 міста Одеси / Є. В. Любий, В. М. Чижик, С. В. Ковбан // Системи управління, навігації та зв'язку, № 3, – С. 63–71.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2019_3_12.4.
5. Руденко, М. (2024). Комплексна оцінка якості надання послуг пасажиром залізничного транспорту, як стратегічний інструмент для забезпечення економічного успіху залізничних підприємств / М. Руденко // Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, № 326 (1), – С. 233–246.
<https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-38>
6. Ергономіка теплового середовища. (2011). Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT); ДСТУ Б EN ISO 7730:2011.
URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дискомфорт> (дата звернення: 09.11.2024).
7. Тараненко, М. Є., (2022). Кваліметрична модель управління якістю технічної підготовки виробництва транспортної техніки / М. Є. Тараненко, Г. В., Мигаль, Н. В. Кобрина, І. М. Тараненко, Д. В. Молоштан // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 6(37), II, – С. 99–107.
[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.99-107](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.99-107)
8. Пуховский, Е. С. Технологические основы ГАП. Уч. Пособие. – Киев : Вища школа, Головн. Видавн., 1989. – 240 с.

5. ПРОЄКТУВАННЯ РОБОТІВ

УДК 621.865.8

Баранова Є.О., бакалавр

Y.O.Baranova@khai.edu

Баранов О.О., д.т.н., професор

O.Baranov@khai.edu

ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА КІНЕМАТИКИ ДЛЯ ВІДКРИТОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ТИПУ AR3

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасній інженерній практиці роботи з шістьма ступенями свободи (6-DOF), такі як маніпулятор моделі Annin Robotics AR3 [1, 2], набули широкого поширення завдяки їхній доступності, відкритій архітектурі та відповідності навчальним і дослідницьким потребам. Для повноцінного використання потенціалу таких систем необхідним є розв'язання оберненої задачі кінематики (ОЗК), що полягає у знаходженні набору узагальнених координат (кутів повороту приводів) за відомим положенням і орієнтацією захоплювального пристрою в просторі [3]. ОЗК для маніпуляторів з відкритою кінематичною структурою є багатозначною й аналітично складною задачею, розв'язання якої є ключовим етапом при проєктуванні систем керування, плануванні траєкторій і реалізації автономного управління роботизованими системами. Для платформи AR3 особливо актуальним є розроблення точних та обчислювально ефективних методів розв'язання цієї задачі, враховуючи її конфігурацію та специфіку розміщення систем координат (рис. 1).

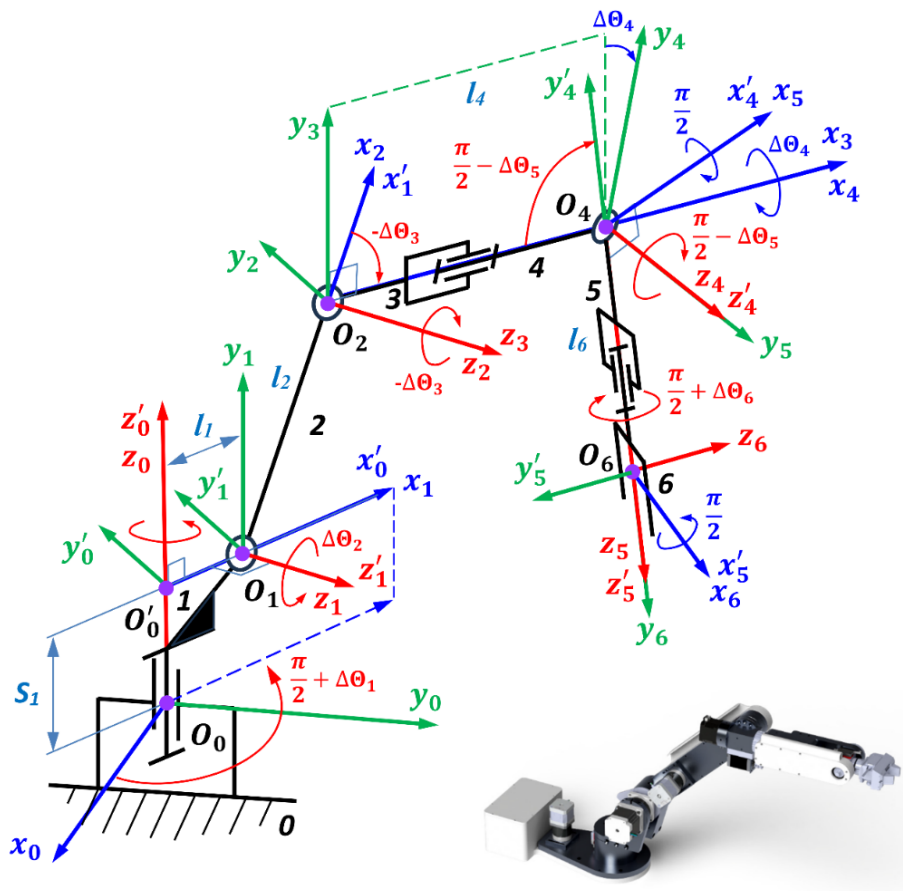


Рис. 1. Кінематична схема робота-маніпулятора моделі Annin Robotics AR3, що застосовується для розв'язання оберненої задачі кінематики

У даній роботі розглянуто структурно-алгебраїчний підхід до побудови рівнянь ОЗК, який ґрунтується на застосуванні гвинтових перетворень між послідовними ланками маніпулятора та формулюванні рівнянь на основі матричних переходів між відповідними системами координат [4]. Такий підхід дозволяє врахувати як геометричні параметри механізму, так і орієнтацію кінцевого елемента кінематичного ланцюга, задану у вигляді гомогенної матриці перетворення. На основі отриманих рівнянь формується система нелінійних рівнянь, яка розв'язується з використанням послідовної аналітичної декомпозиції. Запропонована методика забезпечує інженерну прозорість, добру масштабованість до інших конфігурацій роботів, а також дозволяє легко модифікувати її для використання у середовищах CAD/CAE або в симуляторах, таких як MATLAB/Simulink, ROS чи Gazebo [5, 6]. Отримані результати можуть бути безпосередньо застосовані для керування рухом роботизованих систем у задачах маніпуляції, зварювання, 3D-друку, медичної автоматизації та інших галузях, де важливе точне позиціонування робочого органу.

Робот-маніпулятора моделі AR3 характеризується шістьма ступенями свободи ($n = 6$) [7], і символічно структуру цього механізму можна записати у вигляді $O \perp O \parallel O \perp O \perp O \perp O$. Особливістю розглядуваного методу є вибір систем координат на сусідніх ланках: системи координат вибираються таким чином, що стара система може бути поєднана з новою одним гвинтовим переміщенням. Кінематична схема маніпулятора з системами координат, суміщеними гвинтовими переміщеннями, наведена на рис. 1, а схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі наведена на рис. 2.

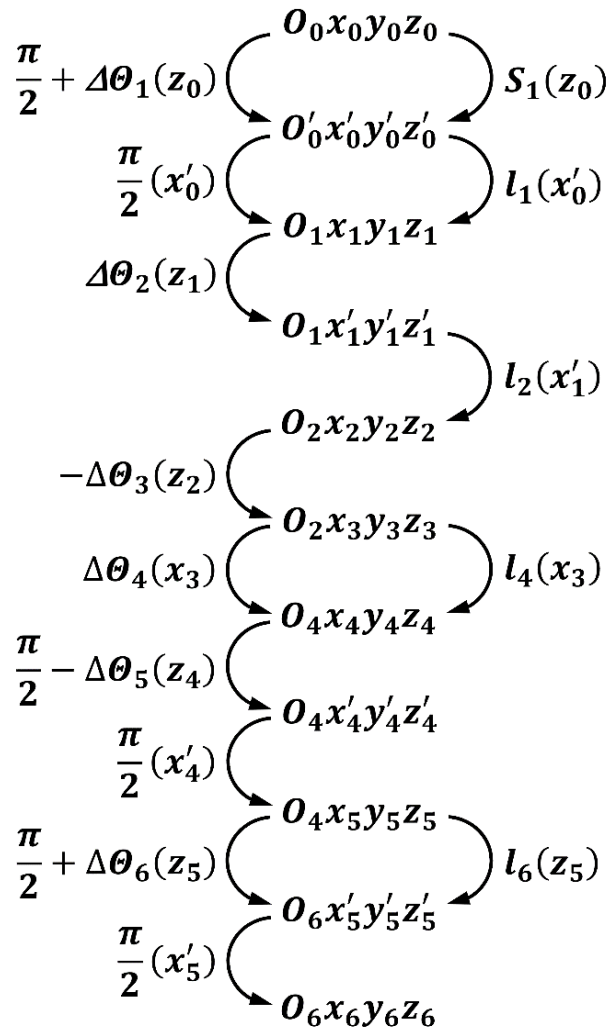


Рис. 2. Схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі маніпулятора моделі Annin Robotics AR3

Матриці, що визначають відносні положення систем координат, мають вигляд

$$A_{00'} = \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\theta_1) & -\cos(\Delta\theta_1) & 0 & 0 \\ \cos(\Delta\theta_1) & -\sin(\Delta\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$A_{0'1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$A_{11'} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_2) & -\sin(\Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_2) & \cos(\Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$A_{1'2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_3) & \sin(\Delta\theta_3) & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta_3) & \cos(\Delta\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$A_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 \\ 0 & \cos(\Delta\theta_4) & -\sin(\Delta\theta_4) & 0 \\ 0 & \sin(\Delta\theta_4) & \cos(\Delta\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$A_{44'} = \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta_5) & -\cos(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ \cos(\Delta\theta_5) & \sin(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$A_{4'5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A_{55'} = \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\theta_6) & -\cos(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ \cos(\Delta\theta_6) & -\sin(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$A_{5'6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Матрицю переходу A_{06} при визначенні відносних положень ланок за заданим положенням захоплювача вважаємо відомою:

$$A_{06} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a_1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & a_2 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для отримання розрахункових рівнянь запишемо матричні рівняння переходу від системи $O_4x_5y_5z_5$ до системи $O_0x_0y_0z_0$ двома способами. При першому способі від системи $O_4x_5y_5z_5$ переходимо послідовно до систем $O_4x'_4y'_4z'_4$, $O_4x_4y_4z_4$, $O_2x_3y_3z_3$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_1x'_1y'_1z'_1$, $O_1x_1y_1z_1$, $O'_0x'_0y'_0z'_0$, $O_0x_0y_0z_0$. При другому способі від системи $O_4x_5y_5z_5$ переходимо до системи $O_6x'_5y'_5z'_5$ і $O_6x_6y_6z_6$, а потім до системи $O_0x_0y_0z_0$.

У першому випадку матричне рівняння перетворення координат має вигляд

$$[x_0] = A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{23}A_{34}A_{44'}A_{4'5}[x_5]. \quad (12)$$

У другому випадку

$$[x_0] = A_{06}A_{65'}A_{5'5}[x_5] = A_{06}A_{5'6}^{-1}A_{55}^{-1}[x_5] = A_{06}A_{65}[x_5]. \quad (13)$$

де $[x_0]$ і $[x_5]$ – матриці-стовпці координат довільної точки відповідно в системах $O_0x_0y_0z_0$ і $O_4x_5y_5z_5$; A_{65} – матриця переходу від системи $O_6x_6y_6z_6$ до системи $O_4x_5y_5z_5$.

Ця матриця є добутком матриць $A_{55}^{-1} = A_{5'5}$ і $A_{5'6}^{-1} = A_{65'}$:

$$A_{55}^{-1} = A_{5'5} = \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\theta_6) & \cos(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ -\cos(\Delta\theta_6) & -\sin(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$A_{5'6}^{-1} = A_{65'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Отже

$$A_{65} = A_{65'}A_{5'5} = \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\theta_6) & \cos(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_6 \\ \cos(\Delta\theta_6) & \sin(\Delta\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (12) і (13), отримуємо

$$A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{23}A_{34}A_{44'}A_{4'5} = A_{06}A_{65}. \quad (17)$$

Ліву частину рівняння (17) подаємо у вигляді

$$A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{23}A_{34}A_{44'}A_{4'5} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де

$$p_{11} = [\sin(\Delta\theta_1)\sin(\theta_2 - \theta_3)\cos\theta_4 + \cos(\Delta\theta_1)\sin\theta_4]\cos\theta_5 - \sin(\Delta\theta_1)\cos(\theta_2 - \theta_3)\sin\theta_5$$

$$\begin{aligned}
p_{21} &= [-\cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4) + \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_4)]\cos(\Delta\theta_5) \\
&\quad + \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_5) \\
p_{31} &= \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4)\cos(\Delta\theta_5) + \sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_5) \\
p_{12} &= -\sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4) + \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_4) \\
p_{22} &= \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4) + \sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_4) \\
p_{32} &= -\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{13} &= -([\sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4) + \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_4)]\sin(\Delta\theta_5) \\
&\quad + \sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_5)) \\
p_{23} &= [\cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4) - \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_4)]\sin\theta_5 \\
&\quad + \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_5) \\
p_{33} &= \sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_5) - \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4)\sin(\Delta\theta_5) \\
p_{14} &= -\sin(\Delta\theta_1)[l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_4\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)] \\
p_{24} &= \cos(\Delta\theta_1)[l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_4\cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)] \\
p_{34} &= S_1 + l_2\sin(\Delta\theta_2) + l_4\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)
\end{aligned}$$

Праву частину рівняння (17) подаємо у вигляді

$$A_{06}A_{65} = \begin{bmatrix} \alpha_{13}\cos(\Delta\theta_6) - \alpha_{11}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{11}\cos(\Delta\theta_6) + \alpha_{13}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{12} & a_1 - l_6\alpha_{12} \\ \alpha_{23}\cos(\Delta\theta_6) - \alpha_{21}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{21}\cos(\Delta\theta_6) + \alpha_{23}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{22} & a_2 - l_6\alpha_{22} \\ \alpha_{33}\cos(\Delta\theta_6) - \alpha_{31}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{31}\cos(\Delta\theta_6) + \alpha_{33}\sin(\Delta\theta_6) & \alpha_{32} & a_3 - l_6\alpha_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Визначивши добуток матриць у лівій і правій частинах рівняння (17) і прирівнявши відповідні елементи, отримаємо систему рівнянь, які дозволяють розв'язати обернену задачу і послідовно визначити значення узагальнених координат, що відповідають орієнтації та положенню робочого органу, які визначені матрицею A_{06} :

$$\begin{aligned}
\Delta\theta_1 &= \arctg\left(-\frac{a_1 - l_6\alpha_{12}}{a_2 - l_6\alpha_{22}}\right) \\
\cos(\Delta\theta_3) &= \frac{1}{2l_2l_4} \left[\left(\left(\frac{a_2 - l_6\alpha_{22}}{\cos(\Delta\theta_1)} - l_1 \right)^2 + (a_3 - l_6\alpha_{32} - S_1)^2 \right) - l_2^2 - l_4^2 \right] \\
\sin(\Delta\theta_3) &= \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2l_2l_4} \left[\left(\left(\frac{a_2 - l_6\alpha_{22}}{\cos(\Delta\theta_1)} - l_1 \right)^2 + (a_3 - l_6\alpha_{32} - S_1)^2 \right) - l_2^2 - l_4^2 \right] \right)^2} \\
\Delta\theta_3 &= \arccos\left(\frac{1}{2l_2l_4} \left[\left(\left(\frac{a_2 - l_6\alpha_{22}}{\cos(\Delta\theta_1)} - l_1 \right)^2 + (a_3 - l_6\alpha_{32} - S_1)^2 \right) - l_2^2 - l_4^2 \right]\right) \\
\Delta\theta_2 &= \arctg\left(\frac{(l_2 + l_4\cos(\Delta\theta_3))(a_3 - l_6\alpha_{32} - S_1) + l_4\sin(\Delta\theta_3)\left(\frac{a_2 - l_6\alpha_{22}}{\cos(\Delta\theta_1)} - l_1\right)}{(l_2 + l_4\cos(\Delta\theta_3))\left(\frac{a_2 - l_6\alpha_{22}}{\cos(\Delta\theta_1)} - l_1\right) - l_4\sin(\Delta\theta_3)(a_3 - l_6\alpha_{32} - S_1)}\right) \\
\Delta\theta_5 &= \arccos(\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\alpha_{32} + \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)(\cos(\Delta\theta_1)\alpha_{22} - \sin(\Delta\theta_1)\alpha_{12}))
\end{aligned}$$

$$\Delta\theta_4 = \arcsin\left(\pm \frac{\left[-\frac{\alpha_{12}}{\cos(\Delta\theta_1)} + \frac{\sin\theta_1 \sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\alpha_{32}}{\cos\theta_1 \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)} - \frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1 \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)}\right]}{\sqrt{1 - (\sin(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)\alpha_{32} + \cos(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3)(\cos(\Delta\theta_1)\alpha_{22} - \sin\theta_1\alpha_{12}))^2}}\right)$$

Таким чином, у ході роботи було сформульовано та аналітично розв'язано обернену задачу кінематики для шестивісного маніпулятора типу AR3. Запропоновано структурно-алгебраїчний підхід до виведення рівнянь, що враховує конфігурацію робота та дозволяє відшукати набір кутів повороту виконавчих ланок за заданим положенням і орієнтацією інструмента в просторі. Розроблений метод демонструє ефективність, прозорість побудови та потенціал для інтеграції у чисельні симуляційні середовища, а також у програмне забезпечення для реального часу. Це робить його придатним як для навчальних цілей, так і для впровадження в задачах технічної автоматизації, зокрема для відкритих роботизованих платформ на зразок AR3. Подальші дослідження планується спрямувати на врахування обмежень за спільними кутами, уникнення сингулярностей та впровадження зворотного кінематичного розв'язання в систему адаптивного керування рухом.

Список використаних джерел

1. Kinematic Analysis of 6 DOF Articulated Robotic Arm / Thangavelu, Aravinthkumar & M, Suresh & B, Vinod // International Research Journal of Multidisciplinary Technovation. – 2021. – Vol. 3. – p. 1–5.
2. Research on path planning of intelligent maintenance robotic arm for distribution lines under complex environment / K. Mi, Y. Fu, C. Zhou, W. Ji, M. Fu, R. Liang // Computers and Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 120. – Article No. 109711. – p. 1–16.
3. Siciliano, B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer, 2016. – 2228 p.
4. Chen Q. Improved Inverse Kinematics Algorithm Using Screw Theory for a Six-DOF Robot Manipulator / Q. Chen, S. Zhu, X. Zhang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2015. – Vol. 12, Iss. 10. – p. 1–9.
5. Development of a prototype 6 degree of freedom robot arm / T. T. Tung, N. Van Tinh, D. T. P. Thao, T. V. Minh // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 18. – Article No. 101049. – p. 1–12.
6. IROSim: Industrial Robotics Simulation Design Planning and Optimization platform based on CAD and knowledgeware technologies / K. Baizid, S. Ćuković, J. Iqbal, A. Yousnadj, R. Chellali, A. Meddahi, G. Devedžić, I. Ghionea // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2016. – Vol. 42. – p. 121–134.
7. Кінематичний розрахунок положення та орієнтації захоплювального пристрою робота Annin Robotics AR3 / О. О. Баранов, Є. О. Баранова, А. О. Бреус, О. Ю. Кладова // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 103. – X., 2025. – С. 15–36.

ГВИНТОВИЙ МЕТОД У ЗАДАЧІ ОБЕРНЕНОЇ КІНЕМАТИКИ ПОРТАЛЬНОГО МАНІПУЛЯТОРА З П'ЯТЬМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасних умовах автоматизації промислового виробництва, зокрема в сфері складальних, обробних і транспортних операцій, дедалі більшого поширення набувають роботизовані системи портального типу. Їх ключовою перевагою є жорсткість конструкції, можливість роботи з великими деталями та зручність адаптації до заданого технологічного середовища. Ефективне управління такими роботами безпосередньо залежить від точного розв'язання задачі оберненої кінематики (ОЗК), яка дозволяє визначити набір узагальнених координат виконавчих ланок на основі бажаного положення та орієнтації інструменту в просторі. Попри значну кількість напрацювань у галузі кінематичного моделювання [1–4], специфіка портальних маніпуляторів із обмеженою кількістю ступенів вільності (у даному випадку – п'ять) вимагає розробки адаптованих підходів, що враховують їхню геометричну конфігурацію. Одним із перспективних напрямів є застосування гвинтової теорії руху для формування рівнянь, які описують зв'язки між координатами послідовних ланок системи [5]. Такий підхід дозволяє побудувати компактні матричні вирази переходу між локальними системами координат і забезпечити обчислювальну зручність при реалізації в програмному забезпеченні.

Розглянута конструкція (рис. 1) представляє собою гібридну кінематичну схему, яка поєднує один поступальний і чотири обертальні ступені вільності. Така конфігурація реалізована на базі портального переміщення та шарнірного маніпулятора, закріпленого на рухомій каретці. Перший ступінь – поступальний – реалізує лінійне переміщення всієї каретки вздовж горизонтального порталу, напрямленого вздовж осі x_0 , що дозволяє змінювати положення маніпулятора у площині бази. Подальші чотири ступені – обертальні – відповідають за просторове орієнтування та позиціонування виконавчого органу у 3D-просторі. Для кожної ланки визначено локальну ортонормовану систему координат.

Конфігурація включає такі основні елементи: осьовий зсув S_1 : поступальний рух уздовж осі порталу z'_0 ; оберт навколо осі z_1 : зміна кута $\Delta\theta_2$, причому у початковому положенні між осями x_1 і x'_1 – кут π ; оберт навколо осі z_2 : зміна кута $\Delta\theta_3$, причому у початковому положенні між осями x_2 і x'_2 – кут 0° ; оберт навколо осі z_3 : зміна кута $\Delta\theta_4$, причому у початковому положенні між осями x_3 і x'_3 – кут 0° ; оберт навколо осі x'_3 : зміна кута $\Delta\theta_5$, що забезпечує кінцеву орієнтацію виконавчого органу, причому у початковому положенні між осями z'_3 і z_4 – кут 0° . Кожен суглоб є пасивно-активним з передачею обертального руху від сервоприводів до відповідних ланок. Довжини ланок та відстані між центрами обертання позначені як $l_1, l_2, l_3, l_{45} = l_4 + l_5$, що дозволяє формалізувати систему трансформаційних матриць для подальшого обчислення оберненої задачі кінематики.

Робоче середовище моделюється за допомогою послідовних перетворень між системами координат кожної ланки. Така конфігурація дає змогу забезпечити високу точність позиціонування робочого інструмента в просторі при порівняно простій реалізації механіки та керування. Запропонована структура є перспективною для задач паяння, 3D-друку, монтажу та маніпулювання об'єктами на обмеженому робочому просторі. У цій роботі представлено структурно-алгебраїчний метод формування рівнянь ОЗК для перспективного портального робота-маніпулятора, який враховує гвинтові перетворення та геометричну взаємодію між ланками. Побудовано відповідні матриці переходу, які описують як послідовний перехід між системами координат, так і зворотний розрахунок положення окремих ланок відносно базової.

Подібний підхід дозволяє уникнути багатьох труднощів, пов'язаних із вирішенням систем нелінійних рівнянь, що традиційно виникають у класичних методах оберненої кінематики.

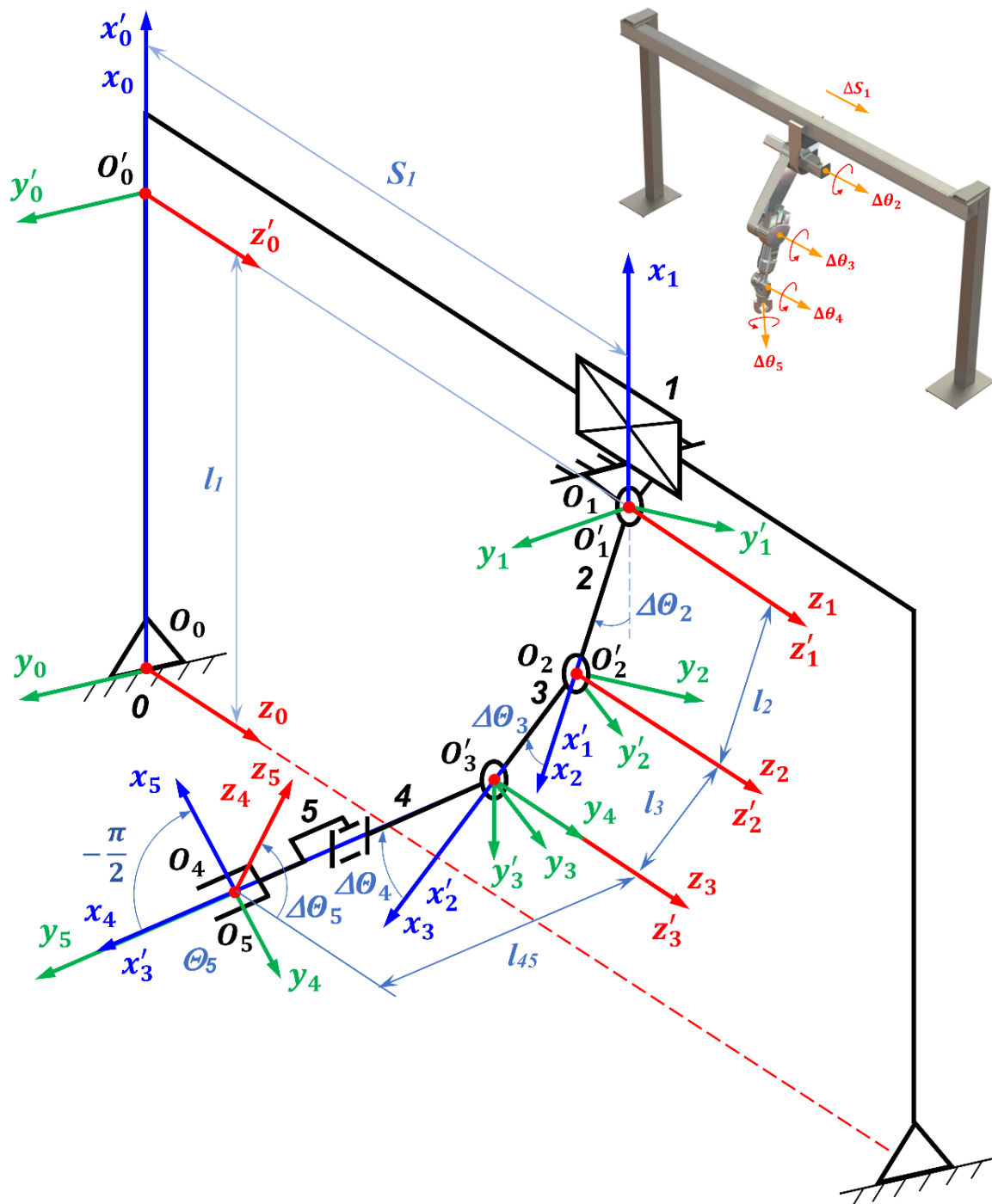


Рис. 1. Кінематична схема перспективного робота-маніпулятора портального типу, що застосовується для розв'язання оберненої задачі кінематики

Запропонований перспективний робот-маніпулятор портального типу характеризується п'ятьма ступенями свободи ($n = 5$), і символічно структуру цього механізму можна записати у вигляді $\Pi||O||O||O\perp O$. Особливістю розглядуваного методу є вибір систем координат на сусідніх ланках: системи координат вибираються таким чином, що стара система може бути поєднана з новою одним гвинтовим переміщенням. Кінематична схема маніпулятора з системами координат, суміщеними гвинтовими переміщеннями, наведена на рис. 1, а схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі наведена на рис. 2.

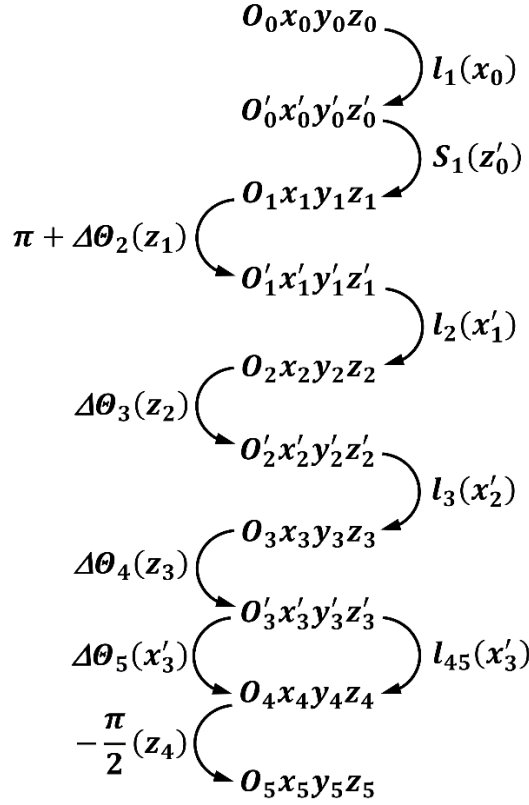


Рис. 2. Схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі перспективного робота-маніпулятора порталного типу

Матриці, що визначають відносні положення систем координат, мають вигляд

$$A_{00'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$A_{0'1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$A_{11'} = \begin{bmatrix} \cos(\pi + \Delta\theta_2) & -\sin(\pi + \Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\pi + \Delta\theta_2) & \cos(\pi + \Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\Delta\theta_2) & \sin(\Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta_2) & -\cos(\Delta\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$A_{1'2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$A_{22'} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_3) & -\sin(\Delta\theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_3) & \cos(\Delta\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$A_{2'3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$A_{33'} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_4) & -\sin(\Delta\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_4) & \cos(\Delta\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$A_{3'4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{45} \\ 0 & \cos(\Delta\theta_5) & -\sin(\Delta\theta_5) & 0 \\ 0 & \sin(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A_{45} = \begin{bmatrix} \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

Матрицю переходу A_{05} при визначенні відносних положень ланок за заданим положенням захоплювача вважаємо відомою:

$$A_{05} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a_1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & a_2 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для отримання розрахункових рівнянь запишемо матричні рівняння переходу від системи $O'_3x'_3y'_3z'_3$ до системи $O_0x_0y_0z_0$ двома способами. При першому способі від системи $O'_3x'_3y'_3z'_3$ переходимо послідовно до систем $O_3x_3y_3z_3$, $O'_2x'_2y'_2z'_2$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_1x'_1y'_1z'_1$, $O_1x_1y_1z_1$, $O'_0x'_0y'_0z'_0$, $O_0x_0y_0z_0$. При другому способі від системи $O'_3x'_3y'_3z'_3$ переходимо до системи $O_4x_4y_4z_4$ і $O_5x_5y_5z_5$, а потім до системи $O_0x_0y_0z_0$.

У першому випадку матричне рівняння перетворення координат має вигляд

$$[x_0] = A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{22'}A_{2'3}A_{33'}[x_{3'}]. \quad (11)$$

У другому випадку

$$[x_0] = A_{05}A_{54}A_{43'}[x_{3'}] = A_{06}A_{45}^{-1}A_{3'4}^{-1}[x_{3'}] = A_{05}A_{53'}[x_{3'}]. \quad (12)$$

де $[x_0]$ і $[x_{3'}]$ – матриці-стовпці координат довільної точки відповідно в системах $O_0x_0y_0z_0$ і $O'_3x'_3y'_3z'_3$; $A_{53'}$ – матриця переходу від системи $O_5x_5y_5z_5$ до системи $O'_3x'_3y'_3z'_3$.

Ця матриця є добутком матриць $A_{55'}^{-1} = A_{5'5}$ і $A_{5'6}^{-1} = A_{65'}$:

$$A_{3'4}^{-1} = A_{43'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_{45} \\ 0 & \cos(\Delta\theta_5) & \sin(\Delta\theta_5) & 0 \\ 0 & -\sin(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$A_{45}^{-1} = A_{54} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Отже

$$A_{53'} = A_{54}A_{43'} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos(\Delta\theta_5) & -\sin(\Delta\theta_5) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -l_{45} \\ 0 & -\sin(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (12) і (13), отримуємо

$$A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{22'}A_{2'3}A_{33'} = A_{05}A_{53'}. \quad (16)$$

Ліву частину рівняння (16) подаємо у вигляді

$$A_{00'}A_{0'1}A_{11'}A_{1'2}A_{22'}A_{2'3}A_{33'} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & 0 & p_{24} \\ 0 & 0 & 1 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де

$$p_{11} = \sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4) - \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4)$$

$$p_{21} = -\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4) - \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4)$$

$$p_{12} = \sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4) + \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4)$$

$$p_{22} = \sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\sin(\Delta\theta_4) - \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)\cos(\Delta\theta_4)$$

$$p_{14} = l_1 - l_2\cos(\Delta\theta_2) - l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)$$

$$p_{24} = -l_2\sin(\Delta\theta_2) - l_3\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)$$

Праву частину рівняння (16) подаємо у вигляді

$$A_{05}A_{53'} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{05}A_{53'} = \begin{bmatrix} \alpha_{12} & = -\alpha_{11}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{13}\sin(\Delta\theta_5) & -\alpha_{11}\sin(\Delta\theta_5) + \alpha_{13}\cos(\Delta\theta_5) & a_1 - l_{45}\alpha_{12} \\ \alpha_{22} & -\alpha_{21}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{23}\sin(\Delta\theta_5) & -\alpha_{21}\sin(\Delta\theta_5) + \alpha_{23}\cos(\Delta\theta_5) & a_2 - l_{45}\alpha_{22} \\ \alpha_{32} & -\alpha_{31}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{33}\sin(\Delta\theta_5) & -\alpha_{31}\sin(\Delta\theta_5) + \alpha_{33}\cos(\Delta\theta_5) & a_3 - l_{45}\alpha_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Визначивши добуток матриць у лівій і правій частинах рівняння (16) і прирівнявши відповідні елементи $p_{ij} = q_{ij}$, отримаємо систему рівнянь, які дозволяють розв'язати обернену задачу [6] і послідовно визначити значення узагальнених координат, що відповідають орієнтації та положенню робочого органу, які визначені матрицею A_{05} .

$$S_1 = a_3 - l_{45}\alpha_{32}$$

$$\Delta\theta_5 = -\arctg \frac{\alpha_{31}}{\alpha_{33}} = \arctg \frac{\alpha_{13}}{\alpha_{11}} = \arctg \frac{\alpha_{23}}{\alpha_{21}} = \arctg \frac{\alpha_{33}}{\alpha_{31}} = \arctg \frac{\alpha_{22}\alpha_{21} + \alpha_{11}\alpha_{12}}{\alpha_{22}\alpha_{23} + \alpha_{13}\alpha_{12}}$$

$$\Delta\theta_3 = \pm \arccos \frac{(l_1 - a_1 + l_{45}\alpha_{12})^2 + (a_2 - l_{45}\alpha_{22})^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\Delta\theta_2 = \arctg \frac{a_2 - l_{45}\alpha_{22}}{l_1 - a_1 + l_{45}\alpha_{12}} - \arctg \frac{l_3 \sin(\Delta\theta_3)}{l_2 + l_3 \cos(\Delta\theta_3)}$$

$$\Delta\theta_4 = \arcsin(\alpha_{12} \sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) - \alpha_{22} \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3))$$

У роботі проведено аналітичне моделювання оберненої задачі кінематики для портального маніпулятора з п'ятьма ступенями свободи з використанням методу гвинтових перетворень. Такий підхід дозволив описати просторову взаємодію ланок за допомогою гвинтових осей та експонент, що значно спростило процес аналітичного обернення кінематичного ланцюга. Отримано вирази для обчислення кутових положень приводів на основі заданого положення і орієнтації робочого органа, з урахуванням конструктивних обмежень конфігурації. Застосований гвинтовий формалізм дозволяє точно враховувати геометрію маніпулятора і зменшує кількість умовно некоректних рішень, порівняно з класичними матричними методами. Використана методика є універсальною для широкого класу маніпуляторів відкритої архітектури та може бути впроваджена в алгоритми керування або верифікаційні програмні модулі для освітніх і промислових роботизованих систем. Запропоноване розв'язання може бути корисним не лише в інженерному проектуванні роботизованих модулів, але й у навчальному процесі при викладанні дисциплін, пов'язаних із мехатронікою, робототехнікою та системами автоматичного управління. Результати можуть бути реалізовані у вигляді окремого модуля в системах CAD/CAM або інтегровані до симуляційних середовищ типу MATLAB/Simulink, ROS або Gazebo, з можливістю подальшої оптимізації траєкторій руху захоплювача.

Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування обмежень по кутам обертання та аналіз сингулярних конфігурацій системи. Особливу увагу буде приділено адаптації гвинтового підходу до задач оптимізації траєкторій руху та підвищення точності позиціонування.

Список використаних джерел

1. Gantry Robot for Mobile Observation / H. Jamaludin, M. N. Mansor, A. K. Junoh, A. Idris // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 798. – p. 70-74.
2. Linear Gantry Robot Control System / S. Date, S. Makwana, D. Mewada, S. D. Degadwala. – 4th National Conference on Advances in Engineering and Applied Science : Maharashtra, India. – 2020. – Vol. 5, Iss. 7. – p. 30-38.
3. Siciliano, B. *Springer Handbook of Robotics* / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer, 2016. – 2228 p.
4. Баранов, О. О. Моделювання прямої кінематики п'ятиступеневого портального робота з використанням методу Денавіта-Хартенберга / О. О. Баранов, М. П. Ковальов, А. О. Бреус // *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. – Вип. 104. – X., 2025. – С. 145–167.
5. Chen Q. Improved Inverse Kinematics Algorithm Using Screw Theory for a Six-DOF Robot Manipulator / Q. Chen, S. Zhu, X. Zhang // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2015. – Vol. 12, Iss. 10. – p. 1–9.
6. Craig, J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* / J. Craig. – New York: Pearson Prentice Hall, 2005. – 408 p.

**АЛГЕБРАЇЧНЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ
ПІДЛОГОВОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА З ГІБРИДНОЮ СТРУКТУРОЮ**
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасних умовах розвитку робототехнічних систем зростає потреба у високоточних, надійних та адаптивних механізмах, здатних ефективно функціонувати в обмежених просторах із змінними умовами експлуатації [1]. Особливого значення набувають роботи-маніпулятори підлогового типу, які використовуються в задачах автоматизованого складання, паяння, 3D-друку, а також для точного маніпулювання об'єктами в малих об'ємах [2]. Надійне вирішення оберненої задачі кінематики (ОЗК) для таких механізмів є критичним етапом, що визначає точність позиціонування та стабільність роботи системи загалом [3]. У цьому контексті значний інтерес викликають альтернативні підходи до формування кінематичних моделей, які дозволяють зменшити обчислювальні витрати та уникнути типових проблем, пов'язаних із системами нелінійних рівнянь.

У представленій роботі розглянуто гібридну кінематичну структуру перспективного п'ятиступеневого підлогового робота-маніпулятора [4]. Основна увага приділена застосуванню структурно-алгебраїчного підходу до розв'язання ОЗК на основі гвинтових перетворень, що забезпечують єдиний опис відносного положення суміжних ланок. Особливістю запропонованої методики є вибір систем координат таким чином, щоб перехід між ними можна було описати одним гвинтовим переміщенням. На відміну від традиційного методу Денавіта–Хартенберга, який часто призводить до складних трансцендентних рівнянь і потребує чисельної ітерації для кожного нового положення робочого органа, гвинтовий підхід дозволяє формалізувати кінематичні залежності через компактніші матричні вирази. Це забезпечує кращу аналітичну керованість та вищу ефективність при розв'язанні ОЗК, особливо у випадках складних багатоланкових систем з гібридними ступенями свободи. Більш того, гвинтові перетворення дають змогу точніше враховувати орієнтацію та положення ланок в тривимірному просторі, що є принципово важливим у задачах точного керування.

Зображений на рис. 1 маніпулятор представляє собою перспективну гібридну кінематичну структуру підлогового типу з п'ятьма ступенями свободи, що поєднує два поступальні та три обертальні рухи [5]. Така конфігурація забезпечує розширені функціональні можливості при збереженні відносної простоти конструкції та високої точності позиціонування кінцевого виконавчого органу у тривимірному просторі. Основою конструкції є рухома платформа, яка здатна переміщуватися вздовж горизонтальної напрямної, що дозволяє значно розширити робочий простір у площині. Вертикальне переміщення виконується за допомогою гвинтового підйомного механізму, змонтованого над основною платформою, що дозволяє точно регулювати висоту інструмента. У верхній частині вертикальної стійки розташований обертовий вузол, який здійснює обертання навколо вертикальної осі та виконує функцію базового повороту всієї маніпуляторної частини. Подальше передавання руху відбувається через послідовно з'єднані обертальні ланки, які забезпечують зміни орієнтації робочого органу у вертикальній площині, а також дозволяють здійснювати точне обертання самого захоплювача навколо його поздовжньої осі. Такий набір ступенів свободи є достатнім для виконання більшості прецизійних технологічних операцій, включаючи складання, паяння, маніпулювання крихкими об'єктами або 3D-друк. З конструктивної точки зору запропонована кінематична схема створює сприятливі умови для застосування гвинтового підходу до опису руху між ланками, що дозволяє реалізувати уніфіковану математичну модель на основі гвинтових перетворень. Такий підхід спрощує як

пряме, так і зворотнє кінематичне моделювання, знижуючи складність аналітичного апарату та підвищуючи ефективність обчислень.

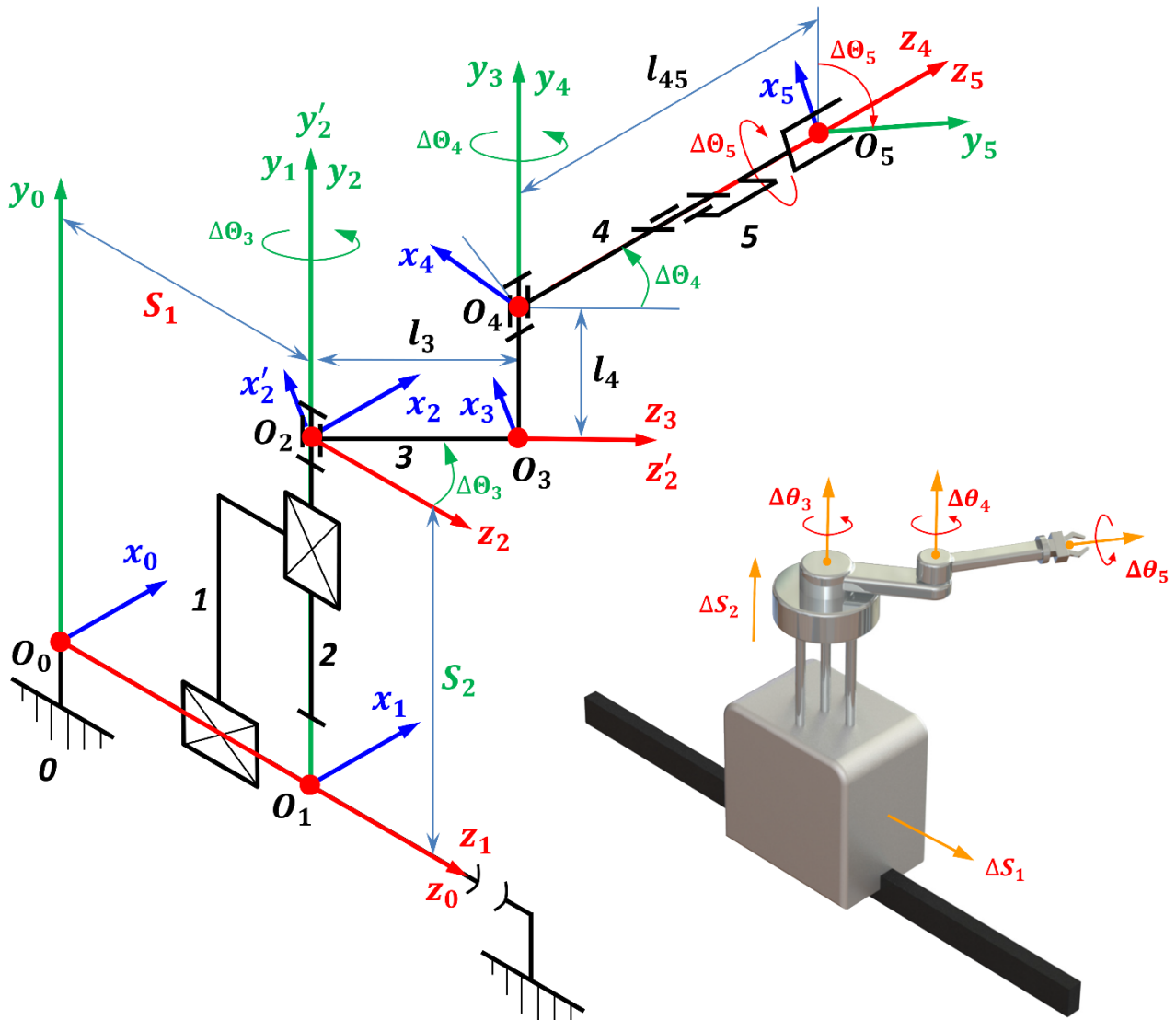


Рис. 1. Кінематична схема перспективного робота-маніпулятора підлогового типу, що застосовується для розв'язання оберненої задачі кінематики

Робот має п'ять ступенів свободи ($n = 5$): ΔS_1 – поступальний рух уздовж горизонтальної осі, який забезпечує переміщення основи робота вздовж лінійної напрямної (наприклад, рейки) і дозволяє покривати великий робочий простір у горизонтальному напрямку; ΔS_2 – поступальний рух вертикально вгору, що здійснюється за рахунок гвинтового (або телескопічного) механізму і надає можливість регулювати висоту виконавчого механізму; $\Delta \theta_3$ – обертання навколо вертикальної осі (в основі маніпулятора), що дозволяє орієнтувати плече маніпулятора по азимуту; $\Delta \theta_4$ – обертання проміжного плеча, що змінює нахил ланки в площині, що забезпечує регулювання відстані та кута до об'єкта; $\Delta \theta_5$ – обертання захоплювального пристрою (кінцевого виконавчого органа) навколо його власної осі, що забезпечує необхідну орієнтацію інструмента або маніпулятора.

Представлена на рис. 1 кінематична схема описує структуру п'ятиступеневого гібридного робота-маніпулятора, яка розроблена з урахуванням можливості формального аналітичного опису у рамках гвинтової теорії руху, що є ефективним засобом для розв'язання оберненої задачі кінематики (ОЗК). Базова точка O_0 відповідає початку координатної системи

маніпулятора, де вісь y_0 спрямована вертикально вгору. Поступальний ступінь свободи S_1 забезпечує лінійне переміщення всієї конструкції уздовж горизонтальної осі, у напрямку z_0 . Наступний поступальний ступінь S_2 , реалізований у вертикальній площині, відповідає за підйом виконавчого механізму. Після нього система переходить до обертального руху навколо осі y_2 у точці O_2 , який задається кутом $\Delta\theta_3$. Цей рух обертає проміжну ланку в горизонтальній площині, змінюючи орієнтацію плеча маніпулятора. Подальші обертальні ступені $\Delta\theta_4$ та $\Delta\theta_5$, відповідно навколо осей z_3 та z_4 , відповідають за орієнтацію ланки перед робочим органом та обертання самого робочого органу. Координатні системи $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$, $O'_2x'_2y'_2z'_2$, $O_3x_3y_3z_3$, $O_4x_4y_4z_4$ та $O_5x_5y_5z_5$ послідовно пов'язані з відповідними ланками маніпулятора, що дозволяє описати відносні положення усіх елементів за допомогою матриць гвинтових перетворень.

Схема чітко демонструє узгодження систем координат таким чином, щоб кожен перехід між ланками міг бути описаний єдиним гвинтовим переміщенням. Це значно спрощує аналітичну побудову функціональної залежності між узагальненими координатами та положенням виконавчого органу, зменшуючи складність та обчислювальні витрати при розв'язанні оберненої задачі кінематики. Така структурна організація є особливо придатною для формалізації задач просторового керування та точного позиціонування у системах автоматизованого складання та обробки. Символічно структуру цього механізму можна записати у вигляді $\text{П}\perp\text{П}\parallel\text{O}\parallel\text{O}\perp\text{O}$. Схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі наведена на рис. 2.

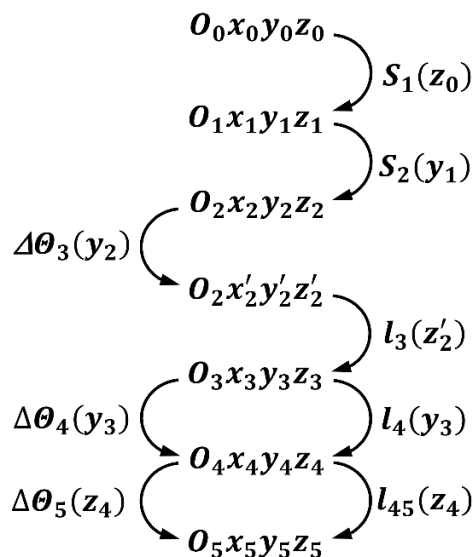


Рис. 2. Схема переходу між системами координат для розрахунку оберненої задачі перспективного робота-маніпулятора підлогового типу

Матриці, що визначають відносні положення систем координат, мають вигляд

$$M_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$M_{22'} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_3) & 0 & \sin(\Delta\theta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta_3) & 0 & \cos(\Delta\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$M_{2'3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$M_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_4) & 0 & \sin(\Delta\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ -\sin(\Delta\theta_4) & 0 & \cos(\Delta\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$M_{45} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_5) & -\sin(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

Матрицю переходу M_{05} при визначенні відносних положень ланок за заданим положенням захоплювача вважаємо відомою:

$$M_{05} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a_1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & a_2 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для отримання розрахункових рівнянь запишемо матричні рівняння переходу від системи $O_4x_4y_4z_4$ до системи $O_0x_0y_0z_0$ двома способами. При першому способі від системи $O_4x_4y_4z_4$ переходимо послідовно до систем $O_3x_3y_3z_3$, $O_2'x_2'y_2'z_2'$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_1x_1y_1z_1$, $O_0x_0y_0z_0$. При другому способі від системи $O_4x_4y_4z_4$ переходимо до системи $O_5x_5y_5z_5$, а потім до системи $O_0x_0y_0z_0$.

У першому випадку матричне рівняння перетворення координат має вигляд

$$[x_0] = M_{01}M_{12}M_{22'}M_{2'3}M_{34}[x_4]. \quad (8)$$

У другому випадку

$$[x_0] = M_{05}M_{54}[x_4] = M_{05}M_{45}^{-1}[x_4]. \quad (9)$$

де $[x_0]$ і $[x_4]$ – матриці-стовпці координат довільної точки відповідно в системах $O_0x_0y_0z_0$ і $O_4x_4y_4z_4$; M_{54} – матриця переходу від системи $O_5x_5y_5z_5$ до системи $O_4x_4y_4z_4$.

Матриця $M_{54} = M_{45}^{-1}$ має вигляд:

$$M_{54} = M_{45}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_5) & \sin(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (8) і (9), отримуємо

$$M_{01}M_{12}M_{22'}M_{2'3}M_{34} = M_{05}M_{54}. \quad (16)$$

Ліву частину рівняння (9) подаємо у вигляді

$$M_{01}M_{12}M_{22},M_{2,3}M_{34} = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & p_{13} & p_{14} \\ 0 & 1 & 0 & p_{24} \\ p_{31} & 0 & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де $p_{11} = \cos(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)$; $p_{31} = -\sin(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)$; $p_{13} = \sin(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)$;
 $p_{33} = \cos(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)$; $p_{14} = S_1 + l_3\sin(\Delta\theta_3)$; $p_{24} = S_2 + l_4$; $p_{34} = l_3\cos(\Delta\theta_3)$

Праву частину рівняння (16) подаємо у вигляді

$$M_{05}M_{54} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

де $q_{11} = \alpha_{11}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{12}\sin(\Delta\theta_5)$; $q_{21} = \alpha_{21}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{22}\sin(\Delta\theta_5)$;
 $q_{31} = \alpha_{31}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{32}\sin(\Delta\theta_5)$; $q_{12} = \alpha_{12}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{11}\sin(\Delta\theta_5)$;
 $q_{22} = \alpha_{22}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{21}\sin(\Delta\theta_5)$; $q_{23} = \alpha_{32}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{31}\sin(\Delta\theta_5)$;
 $q_{13} = \alpha_{13}$; $q_{23} = \alpha_{23}$; $q_{33} = \alpha_{33}$; $q_{14} = \alpha_1 - l_{45}\alpha_{13}$; $q_{24} = \alpha_2 - l_{45}\alpha_{23}$; $q_{34} = \alpha_3 - l_{45}\alpha_{33}$;

Визначивши добуток матриць у лівій і правій частинах рівняння (16) і прирівнявши відповідні елементи $p_{ij} = q_{ij}$, отримаємо систему рівнянь, які дозволяють розв'язати обернену задачу [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) = \alpha_{11}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{12}\sin(\Delta\theta_5) \\ 0 = \alpha_{21}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{22}\sin(\Delta\theta_5) \\ -\sin(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) = \alpha_{31}\cos(\Delta\theta_5) - \alpha_{32}\sin(\Delta\theta_5) \\ 0 = \alpha_{12}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{11}\sin(\Delta\theta_5) \\ 1 = \alpha_{22}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{21}\sin(\Delta\theta_5) \\ 0 = \alpha_{32}\cos(\Delta\theta_5) + \alpha_{31}\sin(\Delta\theta_5) \\ \sin(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) = \alpha_{13} \\ 0 = \alpha_{23} \\ \cos(\Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) = \alpha_{33} \\ S_1 + l_3\sin(\Delta\theta_3) = \alpha_1 - l_{45}\alpha_{13} \\ S_2 + l_4 = \alpha_2 - l_{45}\alpha_{23} \\ l_3\cos(\Delta\theta_3) = \alpha_3 - l_{45}\alpha_{33} \end{array} \right.$$

З цих дванадцяти рівнянь послідовно визначаємо значення узагальнених координат, що відповідають орієнтації та положенню робочого органу, які визначені матрицею M_{05} .

$$\Delta\theta_3 = \pm \arccos \frac{\alpha_3 - l_{45}\alpha_{33}}{l_3}$$

$$S_2 = \alpha_2 - l_4 - l_{45}\alpha_{23} = \alpha_2 - l_4$$

$$S_1 = \alpha_1 - l_3\sin\left(\pm \arccos \frac{\alpha_3 - l_{45}\alpha_{33}}{l_3}\right) - l_{45}\alpha_{13}$$

$$\Delta\theta_4 = \pm \arccos(\alpha_{33}) - \Delta\theta_3 = \pm \arccos(\alpha_{33}) \mp \arccos \frac{\alpha_3 - l_{45}\alpha_{33}}{l_3}$$

$$\Delta\theta_5 = \pm \arccos \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2}$$

Таким чином, у даній роботі представлено структурно-алгебраїчний підхід до розв'язання оберненої задачі кінематики для перспективного робота-маніпулятора підлогового типу з п'ятьма ступенями свободи. Запропонована кінематична структура базується на використанні гвинтових перетворень, що дозволяють узгоджено та ефективно описувати взаємне положення систем координат на суміжних ланках. Такий підхід дає змогу уникнути складних нелінійних систем рівнянь, характерних для класичних методів, зокрема методу Денавіта–Хартенберга. Побудовані матриці переходу, що описують як пряме, так і зворотне перетворення координат між ланками, дали змогу вивести замкнену систему рівнянь для визначення узагальнених координат маніпулятора. Це, у свою чергу, підвищує точність розрахунків і забезпечує аналітичну зручність під час розробки алгоритмів керування. Практична ефективність запропонованого підходу підтверджує його доцільність у задачах, що вимагають високої точності позиціонування – таких як паяння, 3D-друк і прецизійне складання. У подальшому планується впровадження розробленого методу в програмне забезпечення систем керування роботами-маніпуляторами, а також розширення дослідження на структури з більшою кількістю ступенів свободи та з урахуванням динамічних факторів. Отримані результати створюють надійне підґрунтя для розвитку ефективних аналітичних методів кінематичного аналізу в галузі промислової робототехніки [6], а також створюють основу для подальших досліджень, зокрема для включення динамічних моделей, реалізації алгоритмів керування в реальному часі та адаптації методу до багатоланкових структур з більш складною конфігурацією. Запропонований підхід є перспективним для задач, що вимагають високої точності позиціонування в умовах обмеженого робочого простору.

Список використаних джерел

1. Siciliano, B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer, 2016. – 2228 p.
2. Craig, J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J. Craig. – New York: Pearson Prentice Hall, 2005. – 408 p.
3. Chen Q. Improved Inverse Kinematics Algorithm Using Screw Theory for a Six-DOF Robot Manipulator / Q. Chen, S. Zhu, X. Zhang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2015. – Vol. 12, Iss. 10. – p. 1–9.
4. Bae, Y. G. Manipulability and kinematic analysis of a home service robot aimed for floor tasks / Y. G. Bae, S. Jung. – 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) : Daejeon, Korea (South). – 2012. – p. 385-38.
5. Баранов, О. О. Аналітичне моделювання прямої кінематики підлогового промислового робота з п'ятьма ступенями свободи методом Денавіта-Хартенберга / О. О. Баранов, А. С. Сорока, А. О. Бреус // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 104. – X., 2025. – С. 97–120.
6. Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry / R. J. Moreno Masey, J. O. Gray, T. J. Dodd, D. G. Caldwell // Industrial Robot. – 2010. – Vol. 37, Iss. 6. – p. 509-517.

АНАЛІЗ ПРЯМОЇ КІНЕМАТИКИ НАВЧАЛЬНОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА З ЧОТИРМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ МЕТОДОМ ДЕНАВІТА–ХАРТЕНБЕРГА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Розвиток робототехнічних систем є однією з провідних тенденцій сучасної інженерії, що охоплює як промислове, так і освітнє середовище [1]. Стрімке впровадження автоматизованих комплексів у виробничі процеси потребує ґрунтовної підготовки фахівців, які володіють як теоретичними знаннями, так і практичними навичками з розроблення, аналізу й керування роботизованими механізмами [2]. Навчальні маніпулятори, як спрощені моделі промислових роботів, є ефективним інструментом для формування таких компетентностей. Вони дозволяють відпрацювати методи математичного моделювання, кінематичного аналізу, побудови систем координат і реалізації алгоритмів керування.

Однією з фундаментальних задач, що вирішуються під час дослідження маніпуляторів, є пряма задача кінематики [3]. Її суть полягає у визначенні положення та орієнтації виконавчого органу робота (захоплювача) у базовій системі координат при заданих значеннях узагальнених координат, тобто положеннях окремих ланок. Розв'язання цієї задачі має критичне значення для коректної роботи системи керування роботом, забезпечення точного позиціонування, обробки зворотного зв'язку та планування траєкторій. Особливо актуальним є вивчення цієї задачі у контексті простих навчальних моделей, які зберігають ключові особливості більш складних механізмів, але є доступними для повного аналітичного опису.

Метод Денавіта–Хартенберга (ДН-метод) є стандартним підходом до аналітичного опису кінематичної структури серійних маніпуляторів [4]. Його суть полягає в тому, що для кожної пари з'єднаних ланок вводиться локальна система координат, а положення наступної системи координат відносно попередньої описується за допомогою чотирьох параметрів: довжини ланки, зсуву вздовж осі, кута обертання та кута нахилу. Ці параметри об'єднуються в однорідну матрицю перетворення, яка дозволяє поетапно визначити положення й орієнтацію будь-якої ланки в базовій системі координат. Застосування методу дозволяє формалізувати й автоматизувати процес побудови кінематичної моделі, особливо в умовах складних багатоланкових структур, що робить його одним із найпоширеніших інструментів у теорії роботів. Пряма задача кінематики маніпуляторів формулюється так: задана кінематична схема маніпулятора і в певний момент часу відомі значення узагальнених координат, що визначають положення всіх ланок маніпулятора одна відносно одної. Потрібно визначити положення і орієнтацію останньої ланки маніпулятора (захоплювача) у системі відліку, зв'язаної зі стояком, причому розміри ланок вважаються заданими [5-8].

У даній роботі розглядається навчальний пластиковий робот-маніпулятор із чотирма ступенями руху (4-DOF), фотографія якого наведена на рис. 1, і конструкція якого містить механічний зв'язок, що обмежує одну з координат – тобто, при усуванні цього зв'язку додається ще одна ступінь руху. Видно, що вісь обертання захоплювального пристрою завжди паралельна площині підлоги, завдяки накладанню механічного зв'язку. Для розв'язання прямої задачі кінематики робота, спочатку видалимо зв'язок і таким чином отримаємо кінематичну схему, яка показана на рис. 2. Після розв'язання задачі для схеми на рис. 2, врахуємо зв'язок і отримаємо остаточне рішення для 4-DOF робота-маніпулятора, показаного на рис. 1.

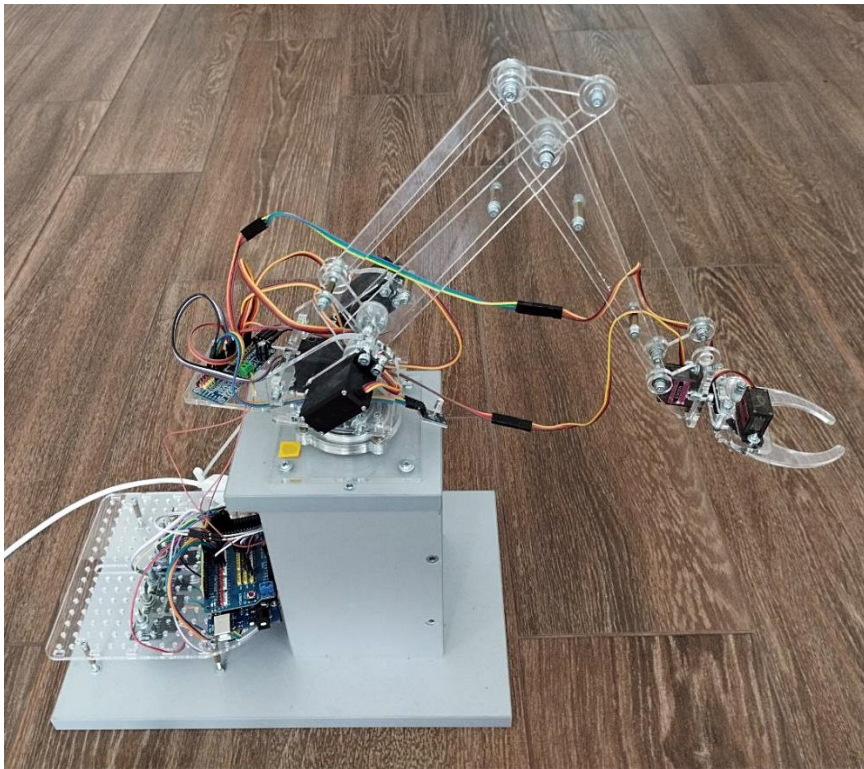


Рис. 1. Фотографія навчального 4-DOF робота-маніпулятора

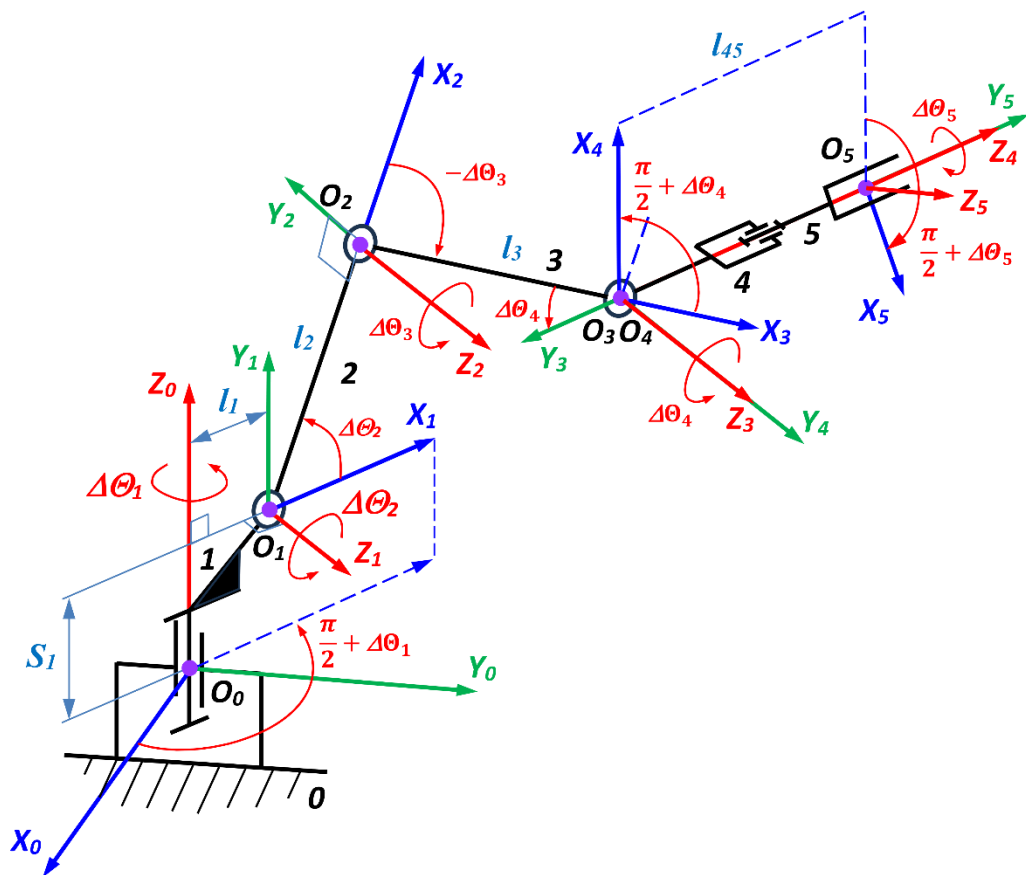


Рис. 2. Кінематична схема 5-DOF робота-маніпулятора, що застосовується для розв'язання прямої задачі кінематики

Оскільки робот-маніпулятора, що зображений на кінематичній схемі рис. 2, характеризується вже п'ятьма ступенями свободи ($n = 5$), в результаті розрахунку мають бути обчислені елементи матриці T_5 , які описують перехід від системи координат, пов'язаної із захоплювальним пристроєм, до базової системи координат:

$$T_5 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Як відомо, стовпці матриці T_5 мають геометричне тлумачення. Перші три елементи першого, другого і третього стовпців є напрямними косинусами відповідно осей x_5, y_5, z_5 у системі 0, а три елементи четвертого стовпця – це координати x_c, y_c, z_c центру захоплювача в тій же системі:

$$T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\widehat{\vec{l}_5, \vec{l}_0}) & \cos(\widehat{\vec{j}_5, \vec{l}_0}) & \cos(\widehat{\vec{k}_5, \vec{l}_0}) & x_c \\ \cos(\widehat{\vec{l}_5, \vec{j}_0}) & \cos(\widehat{\vec{j}_5, \vec{j}_0}) & \cos(\widehat{\vec{k}_5, \vec{j}_0}) & y_c \\ \cos(\widehat{\vec{l}_5, \vec{k}_0}) & \cos(\widehat{\vec{j}_5, \vec{k}_0}) & \cos(\widehat{\vec{k}_5, \vec{k}_0}) & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Отже, отримана матриця T_5 визначає напрямні косинуси:

$$t_{11} = \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) - \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\sin(\Delta\theta_5); \quad (3)$$

$$t_{21} = \sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) + \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\sin(\Delta\theta_5); \quad (4)$$

$$t_{31} = -\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\sin(\Delta\theta_5); \quad (5)$$

$$t_{12} = -\sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4); \quad (6)$$

$$t_{22} = \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4); \quad (7)$$

$$t_{23} = \sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4); \quad (8)$$

$$t_{13} = \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) + \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\cos(\Delta\theta_5); \quad (9)$$

$$t_{23} = \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) + \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\cos(\Delta\theta_5); \quad (10)$$

$$t_{33} = \cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4)\cos(\Delta\theta_5); \quad (11)$$

а також координати центра захоплювального пристрою:

$$t_{14} = -(l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4))\sin(\Delta\theta_1); \quad (12)$$

$$t_{24} = (l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4))\cos(\Delta\theta_1); \quad (13)$$

$$t_{34} = S_1 + l_2\sin(\Delta\theta_2) + l_3\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4); \quad (14)$$

Оскільки у досліджуваній конструкції робота передбачено, що на кути накладається зв'язок виду:

$$\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4 = \Delta_f, \quad (15)$$

причому залежною є саме координата $\Delta\theta_4$, оскільки для $\Delta\theta_2$ і $\Delta\theta_3$ передбачені електроприводи, то можна записати:

$$\Delta\theta_4 = \Delta_f - (\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3). \quad (16)$$

Це спрощує вирази для елементів матриці T_5 :

$$t_{11} = \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) - \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta_f)\sin(\Delta\theta_5); \quad (17)$$

$$t_{21} = \sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) + \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta_f)\sin(\Delta\theta_5); \quad (18)$$

$$t_{31} = -\cos(\Delta_f)\sin(\Delta\theta_5); \quad (19)$$

$$t_{12} = -\sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta_f); \quad (20)$$

$$t_{22} = \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta_f); \quad (21)$$

$$t_{23} = \sin(\Delta_f); \quad (22)$$

$$t_{13} = \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) + \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta_f)\cos(\Delta\theta_5); \quad (23)$$

$$t_{23} = \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) + \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta_f)\cos(\Delta\theta_5); \quad (24)$$

$$t_{33} = \cos(\Delta_f)\cos(\Delta\theta_5); \quad (25)$$

$$t_{14} = -\left(l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\cos(\Delta_f)\right)\sin(\Delta\theta_1); \quad (26)$$

$$t_{24} = \left(l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\cos(\Delta_f)\right)\cos(\Delta\theta_1); \quad (27)$$

$$t_{34} = S_1 + l_2\sin(\Delta\theta_2) + l_3\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45}\sin(\Delta_f); \quad (28)$$

Слід зазначити, що $\Delta_f = 0$ для маніпулятора на рис. 1, і тоді для нього остаточно можна записати:

$$T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) & -\sin(\Delta\theta_1) & \cos(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) & t_{14} \\ \sin(\Delta\theta_1)\cos(\Delta\theta_5) & \cos(\Delta\theta_1) & \sin(\Delta\theta_1)\sin(\Delta\theta_5) & t_{24} \\ -\sin(\Delta\theta_5) & 0 & \cos(\Delta\theta_5) & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

$$t_{14} = -(l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45})\sin(\Delta\theta_1); \quad (30)$$

$$t_{24} = (l_1 + l_2\cos(\Delta\theta_2) + l_3\cos(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3) + l_{45})\cos(\Delta\theta_1); \quad (31)$$

$$t_{34} = S_1 + l_2\sin(\Delta\theta_2) + l_3\sin(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3). \quad (32)$$

Таким чином, у роботі було розв'язано пряму задачу кінематики для навчального робота-маніпулятора з чотирма ступенями свободи. Для побудови математичної моделі використано метод Денавіта–Хартенберга, який дозволив формалізовано описати просторове положення та орієнтацію виконавчого органу відносно базової системи координат.

Під час розрахунків враховано конструктивні особливості маніпулятора, зокрема наявність механічного зв'язку між ланками, що зменшує число незалежних ступенів свободи. Тимчасове усунення цього зв'язку дозволило сформулювати загальну кінематичну схему, що охоплює повну конфігурацію, а подальше врахування обмеження надало змогу отримати остаточне рішення, відповідне реальній моделі робота.

Отримані аналітичні вирази для елементів однорідної матриці перетворення створюють основу для подальшої реалізації алгоритмів прямої кінематики у програмному забезпеченні. Така реалізація дозволить візуалізувати положення захоплювача, здійснювати симуляцію рухів маніпулятора, а також створювати навчальні або лабораторні програмні середовища для підтримки вивчення робототехніки. Запропонований підхід є ефективним не лише для аналітичного аналізу, а й як практичний інструмент інтеграції математичної моделі в системи управління. Запропонований підхід також є ефективним дидактичним засобом у навчальному процесі при вивченні основ кінематики роботів.

Список використаних джерел

1. Siciliano, B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer, 2016. – 2228 p.
2. Robot control and kinematic analysis with 6DoF manipulator using direct kinematic method / K. S. Gaeid, A. F. Nashee, I. A. Ahmed, M. H. Dekheel // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – Vol.10, Iss.1. – 2021. – p. 70-78.
3. Siciliano, B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer, 2016. – 2228 p.
4. Application of Denavit Hartenberg Method in Service Robotics / E. Prada, S. Murali, L. Miková, J. Ligusova // Acta Mechatronica. – 2020. – Vol. 5, Iss. 4. – p. 47-52.
5. Denavit, J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms / J. Denavit, R. S. Hartenberg // Journal of Applied Mechanics. – 1955. – Vol. 22, Iss. 2. – p. 215–221.
6. Кінематичний розрахунок положення та орієнтації захоплювального пристрою робота Annin Robotics AR3 / О. О. Баранов, Є. О. Баранова, А. О. Бреус, О. Ю. Кладова // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 103. – X., 2025. – С. 15–36.
7. Баранов, О. О. Аналітичне моделювання прямої кінематики підлогового промислового робота з п'ятьма ступенями свободи методом Денавіта-Хартенберга / О. О. Баранов, А. С. Сорока, А. О. Бреус // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 104. – X., 2025. – С. 97–120.
8. Баранов, О. О. Моделювання прямої кінематики п'ятиступеневого портального робота з використанням методу Денавіта-Хартенберга / О. О. Баранов, М. П. Ковальов, А. О. Бреус // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 104. – X., 2025. – С. 145–167.

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ В МАНІПУЛЯТОРАХ І МЕХАНІЗМАХ РОБОТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Диференціальні зубчасті механізми широко використовуються в авіаційній галузі як редуктори авіаційних і вертольотних двигунів і в автомобільній галузі для приведення до руху коліс транспортного засобу, або у коробках передач. В сучасній робототехніці ці механізми також знаходять досить широке застосування.

Особливістю диференціальних механізмів є те, що вони мають ступінь рухомості $W=2$ і більше, і тому їх можна використати:

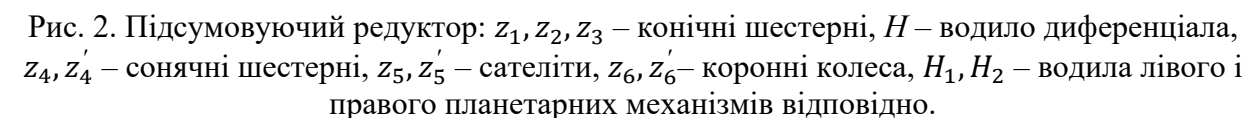
- для приведення до руху декількох користувачів від одного двигуна (власне диференціальні механізми, перший тип),
- для приведення до руху однієї вихідної ланки від двох вхідних роторів (підсумовуючий редуктор, другий тип).



Рис. 1. Крокуюче крісло TBW-1 Matsushima [1]

Другий тип використовується, наприклад, у кранах та підйомних механізмах для забезпечення надійності виконання корисної дії. Також підсумовуючі редуктори використовуються для приведення до руху ланок, що мають два ступені вільності і потребують підвищеного крутного моменту для виконання корисної роботи.

Інший приклад таких механізмів є вузол маніпулятора – диференціальне зап'ястя (differential wrist) [2]. В ньому потужність двох двигунів підводиться до валів конічних коліс, що утворюють конічний диференціал, який, залежно від напрямків обертання двигунів реалізує обертання навколо двох взаємно перпендикулярних осей (yaw and pitch axes). Для задач, де виконання корисної дії потребує більший крутний момент ніж той, що можуть забезпечити обидва двигуни, додатково між валом кожного двигуна і валом конічного колеса використовується планетарний механізм типу $\overline{AI}$. Кінематична схема механізму диференціального зап'ястя наведено на рис. 2.



142

Загальне передатне відношення редуктора визначається як

$$i_{\text{редуктора}} = i_{\text{планет}} i_{\text{диф}}.$$

Редуктор має два режими роботи: перший – коли вали двигунів обертаються в різні сторони, другий – коли вони обертаються у спільному напрямку.

Таким чином, при підведенні до валів сонячних шестерень z_4, z_4' однакових за модулем протилежно спрямованих кутових швидкостей $\omega_4 i \omega_4'$: $\omega_4 = -\omega_4'$ кутова швидкість ω_3 шестерні z_3 у обертанні навколо осі 1 [3]:

$$\omega_3 = \omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega_{\text{дв}}}{i_{4H}^{(6)}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{1 + \frac{z_6}{z_4}}. \quad (1)$$

Співвідношення потужностей, що передаються на механізм і знімається з вихідної ланки Z_3 , описуються рівняннями

$$T_3 \omega_3 = T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 = 2T_{\text{дв}} \left(1 + \frac{z_6}{z_4}\right). \quad (2)$$

При підведенні до валів сонячних шестерень z_4, z_4' однакових за модулем однакою спрямованих кутових швидкостей $\omega_4 i \omega_4'$: $\omega_4 = \omega_4'$ шестерня z_3 буде обертатися спільно з водилом H навколо осі 2 [3] з кутовою швидкістю ω_H , подібним до рівнянням (1):

$$\omega_H = \omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega_{\text{дв}}}{i_{4H}^{(6)}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{1 + \frac{z_6}{z_4}}. \quad (3)$$

Співвідношення потужностей, що передаються на механізм і знімається з вихідної ланки Z_3 , описуються рівняннями

$$T_H \omega_H = T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 = 2T_{\text{дв}} \left(1 + \frac{z_6}{z_4}\right). \quad (4)$$

Згідно [4] передатне відношення $i_{4H}^{(6)}$ планетарного ступеня механізму може змінюватися в діапазоні 2,4..13.

Наведені приклади показують, що використання диференціальних механізмів дозволяє розширити можливості існуючих традиційних конструкцій: підвищити їх корисну потужність, зменшити масу і габарити та інше.

Список використаних джерел

1. Sugahara, Y., Yonezawa, N., Kosuge, K.: A novel stair-climbing wheelchair with transformable wheeled four-bar linkages. In: Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), pp. 3333–3339 (2010)
2. How an Innovative Wrist Design with Built-In Planetary Gearbox Enhances the Performance of 6DOF Robotic Arms <https://ewhiteowls.com/2023/01/very-effective-wrist-design-with-in-built-planetary-gearboxes-for-an-light-weight-and-compact-wrist-for-6dof-robotic-arm/>
3. Основи проєктування механічних вузлів авіаційно-космічної техніки [Текст]: навч. посібник / В. М. Доценко, В. М. Павленко, Ю. В. Ковеза та ін. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2013. – 328 с.
4. Планетарні механізми (оптимальне проєктування). Ткаченко В.А., Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2003. – 446 с.

6. ТЕХНОЛОГІЯ ОБЛАДНАННЯ З ЧПК

УДК 621.01

Бичков І.В., д.т.н.

i.bychkov@khai.edu

Лисоченко І.М., аспірант

i.m.lysochenko@khai.edu

Бичков М.І., к.т.н.

nikolastasnidvorastas@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ У АВІАБУДІВНИЦТВІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасне машинобудівне виробництво, особливо в авіабудівництві, характеризується комбінованим використанням технологій, орієнтованих на людину та на машину. Це породжує невідповідність між традиційними засобами подання інформації (кресленнями), розрахованими на візуальне сприйняття, та вимогами автоматизованих систем, що потребують точних аналітичних моделей. У доповіді показано, що паралельне використання двох мов опису (нарисної та аналітичної геометрії) призводить до формування двох незалежних моделей одного об'єкта, що, у свою чергу, порушує принцип єдності інформаційного простору. Як вирішення проблеми пропонується та обґрунтовується концепція аналітичного еталону деталі (АЕД) (рис. 1) – аналітичної моделі об'єкта виробництва у середовищі CAD/CAM систем.

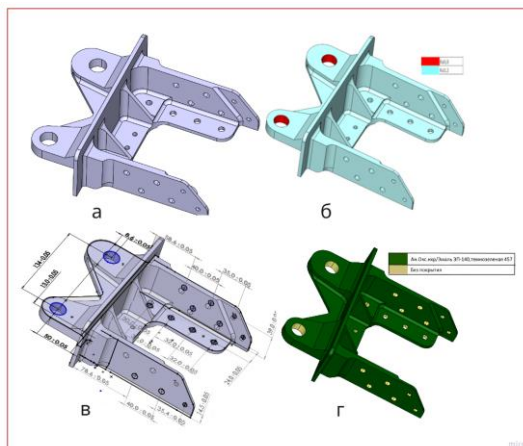


Рис. 1. Формування аналітичного еталону деталі на базі еталонної моделі геометрії:
а – еталонна модель геометрії; поверхні та допусків; б – еталонна модель шорсткості;
в – еталонна модель функціональної точності; г – еталонна модель покриттів

Ця модель містить повний комплекс технологічних атрибутів на етапі виробництва життєвого циклу виробу. Застосування АЕД забезпечує наочність інформації та її однозначну інтерпретацію усіма учасниками життєвого циклу виробу. Окрім того, продемонстровано зниження трудомісткості внесення даних у кілька разів. При виконанні технологічної підготовки виробництва застосування АЕД дає змогу виключити дублювання робіт із забезпечення необхідною інформацією усіх учасників життєвого циклу виробу. Значне зниження трудомісткості спостерігається під час виконання контрольних операцій на обладнанні з ЧПК, що має відповідні вимірювальні можливості. Такий самий ефект досягається при застосуванні АЕД у процесі розроблення технологічної оснастки, пристосувань та виборі необхідного інструменту.

АНАЛІТИЧНИЙ ЕТАЛОН УСТАТКУВАННЯ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ ФОРМОУТВОРЕННІ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Похибки геометричної точності верстата повністю або частково переносяться на заготовки, що обробляються. Їх величини можна заздалегідь оцінити з метою попередження погіршення якості виготовленої деталі. Однією з важливих причин втрати точності верстатів є саме зношування їх напрямних, величина яких може досягати на деяких ділянках 0,1 мм за рік двозмінної експлуатації [1]. Крім того, деформації верстатів при їх неправильному монтажі, а також викривлення станин і столів, поверненість напрямних при осіданні фундаментів під дією маси та ін. стають причиною утворення додаткових систематичних похибок. Таким чином причинами відхилення фізичної системи координат верстату від свого еталону є:

- зношення устаткування;
- помилки виробників керувальних програм (КП), що призводить до створення зусиль при експлуатації устаткування, що перебільшують розрахункові (при вході в матеріал заготівлі, при зіткненні з елементами оснащення тощо);
- помилки при монтажі (демонтажі) устаткування;
- порушення температурного режиму експлуатації та ін.

Високі вимоги до точності та складність форм деталей накладають жорсткі обмеження на умови експлуатації, наприклад, устаткування з ЧПК, що обмежує значення робочих параметрів [2-3]. Ступінь відповідності системи координат формуютьовального устаткування еталонному, як правило, не фіксується, ні в технологічній документації, ні в технічних характеристиках або спеціальному формулярі конкретного верстата. Така інформація з'являється лише після метрологічної атестації устаткування та є підставою для виконання технологічного і метрологічного обслуговування з приведення параметрів формуютьовального устаткування до відповідних вимог точності [4-5].

Заявлена паспортна точність устаткування протягом усього терміну експлуатації може бути забезпечена корекцією відхилень. Це дозволить врахувати такі відхилення у процесі формоутворення. Тому необхідна система приведення фізичної системи координат верстата з ЧПК до еталонної його моделі, що в свою чергу передбачає:

- оснащення верстата системою виміру відхилень координатних осей від еталонних;
- розроблення методик апроксимації значень отриманих відхилень фізичної системи координат;
- створення засобів та методик приведення фізичної системи координат до еталонної шляхом забезпечення компенсації відхилень.

Отже для вирішення завдань формоутворення на реальному устаткуванні з ЧПК необхідна підсистема з приведення до моделі аналітичного еталону устаткування (АЕуст), в якій виконувалося розроблення КП. Така процедура передбачає перерахунок всіх відхилень реальної координатної системи устаткування свого аналітичного зразка [6].

Значення відхилень реальних координат від еталонних визначаються в процесі виконання відповідних процедур перед початком періоду експлуатації верстата. Для цього доцільно використання лазерних інтерферометрів, що дозволяють контролювати прямолінійність напрямних довжиною 1-8 м з похибкою вимірювань, що не перевищує 0,1 мкм на 1 м.

Таким чином, приведення реальної системи координат до еталонної, для якої виконано розрахунок КП на етапі технологічного підготування виробництва, дозволяє реалізувати коректну постановку завдання формоутворення і перейти до практичної реалізації в умовах налагодженого машинобудівного виробництва. Приведення координат виконується шляхом вимірювань відповідних похибок для кожної координатної осі, в результаті чого встановлюється відповідність цих відхилень з показниками лінійного датчика координатної осі устаткування ЧПК. Урахування відхилень фізичної системи координат від еталонної, викликаних, наприклад, зношенням напрямних (рис. 1), забезпечить підвищення точності оброблення на устаткуванні, що експлуатується, впродовж всього життєвого циклу.

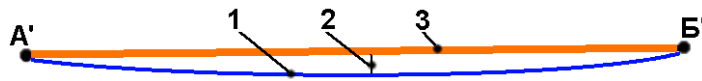


Рис. 1. Корекція напрямної фізичної координати до її еталонного значення: 1 – фізична координата; 2 – відхилення фізичної координатної осі від еталонної; 3 – еталонна координатна вісь

У процесі формоутворення деталі геометрія зношених напрямних приймається незмінною. Результати вимірів відхилень геометрії кожної з напрямних по її довжині (ΔX , ΔY , ΔZ) являються вихідною інформацією для виконання приведення фізичної системи координат устаткування до еталонного стану АЕуст. В свою чергу це дозволить:

- забезпечити експлуатацію верстатів ЧПК без втрат паспортної точності впродовж терміну експлуатації, що виключає необхідність придбання нового устаткування з-за втрат точності;
- реалізувати ефективні експлуатаційні режими з урахуванням можливості компенсування відхилень;
- підвищити точність оброблення на устаткуванні ЧПК.

Отже АЕуст в цілому впливає на інтегральний показник якості деталі при механічному обробленні [7]. В таблиці 1 представлені умови його зростання при вирішенні прямого завдання формоутворення, а в таблиці 2 – зворотного.

Таблиця 1 – Умови зростання інтегрального показника якості деталі при реалізації прямого завдання формоутворення

Пряме завдання формоутворення		
№	Зміст	Спосіб рішення
1	Збільшення швидкості видалення матеріалу	Збільшення швидкості координатних переміщень зони формоутворення
		Забезпечення реалізації режимів високошвидкісного оброблення [8]
2	Підвищення точності обробки	Застосування 5-ти координатної обробки
		Забезпечення термосиметричності верстата
		Підвищення точності завдання переміщень
		Зменшення помилок переміщень
		Зростання точності вимірювання переміщень
3	Забезпечення вимог якості поверхневого шару	Корекція фінішних операцій обробки
		Збільшення номенклатури виконуваних операцій на одиниці обладнання шляхом розширення його функціональних можливостей
4	Забезпечення вимог промислової чистоти поверхні	Вибір способів та режимів з мінімальним забрудненням поверхні
		Встановлення залежностей способів очищення від типів та режимів операцій формоутворення

Таблиця 2 – Умови зростання інтегрального показника якості деталі при реалізації зворотного завдання формоутворення

Зворотне завдання формоутворення		
5	Реалізація процедур контролю якості деталей	Формування портрету деталі (Пд)
		Порівняння аналітичного еталону деталі (АЕд) з його портретом (Пд)
		Ухвалення рішення про якість деталей
6	Реалізація процедур контролю інструменту	Формування портрету інструменту (Пі)
		Порівняння аналітичного еталону інструменту (АЕі) з його портретом (Пі)
		Ухвалення рішення з заміни інструменту або внесення корекції в КП
7	Реалізація процедур контролю за координатною системою обладнання	Формування аналітичного еталону устаткування (АЕуст)
		Формування описів температурних полів та силових впливів у конструкції обладнання
		Врахування впливу сил і температури в зоні формоутворення на координатні осі верстата.
		Формування відхилень координатної системи обладнання від еталонної
		Внесення корекції в КП
8	Аналіз функціонування деталей у складі вузла, агрегату чи виробу	Формування портрету складання (Пскл)
		Корекція АЕд або АЕскл

Отже зазначимо, що процес виготовлення деталей машинобудівним виробництвом є сукупністю рішень прямих і зворотних завдань формоутворення, що визначає їх взаємозв'язок і вплив один на одній. Тоді аналітичний еталон устаткування АЕуст в цілому впливає на точність формоутворення на верстатах з ЧПК, що в свою чергу формує інтегральний показник якості виготовленої деталі.

Список використаних джерел

1. І. В. Бичков, К. В. Майорова та ін. (2023). Інформаційні та технологічні системи супроводу життєвого циклу виробів авіаційної техніки. Монографія, 224 с. ISBN 978-617-8113-63-6
2. Astakhov, V., Davim, J. (2008). Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. In: Machining (pp. 29-57). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_2.
3. Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y. (2000). Metal Machining. Theory and Applications. London: ARNOLD.
4. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення: ДСТУ 2925-94. (1995). Київ: Держстандарт України.
5. Garvin, David A. (1987). Competing on the Eight Dimensions of Quality. Harvard Business Review 65, No. 6.
6. Бычков, И. В. (2010). Описание объекта производства для корректной постановки задачи формообразования. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», (45), 129-135.
7. Бычков, И. В., Планковский, С. И. & Романов, А. А. (2014). Жизненный цикл изделия и его информационное сопровождение. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, 18, 1(62), 149-155.
8. Schulz, H., Spur, G. (1989). Aspect in Cutting Mechanism in High-Speed Cutting. Annals of CIPR – V. 38, (1), 51-54.

ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК ЗА ДОПОМОГОЮ САМ СИСТЕМИ ESPRIT В УМОВАХ РОБОТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному машинобудуванні спостерігається сталий ріст вимог до точності, якості поверхні та продуктивності виготовлення деталей. Це зумовлює потребу у впровадженні цифрових технологій, зокрема інтеграції CAD/CAM-систем із роботизованими виробничими комплексами, з метою забезпечення високого рівня автоматизації та оптимізації виробничих процесів. Сучасний стан питання свідчить про значну кількість досліджень, присвячених впровадженню систем автоматизованого проєктування та виготовлення деталей з використанням верстатів з ЧПК. Системи САМ-класу, такі як Siemens NX, SolidCAM, Mastercam та ESPRIT, активно досліджуються щодо точності моделювання обробки та ефективності створення траєкторій інструменту. Проте значно менше уваги приділено практичній інтеграції САМ-систем із роботизованими виробничими процесами.

Метою роботи є розробка ефективного технологічного процесу механічної обробки деталі на верстаті з числовим програмним керуванням із використанням САМ-системи ESPRIT та адаптація цього процесу до умов роботизованого виробництва.

У межах дослідження було виконано моделювання процесу обробки деталі типу «гайка накидна» 3D модель та зовнішній вигляд наведено на рис. 1.



Рис. 1. 3D модель та зовнішній вигляд «гайка накидна»

Для реалізації процесу обробки деталі було обрано токарний центр Lynx 220 LSY, керуюча програма була створена в середовищі ESPRIT. Особлива увага приділялася правильному підбору інструменту для кожної операції: чорнової та чистової обробки, свердління, нарізування різьби, фрезерування пазів та відрізання деталі. Підібрано ріжучий інструмент із наноструктурним покриттям, що дає змогу забезпечити підвищену зносостійкість при високошвидкісній обробці. Підібрано режими різання (швидкість, подача, глибина різання) з урахуванням властивостей матеріалу та умов охолодження. Створено повну траєкторію обробки, яка забезпечила високу точність геометричних параметрів деталі.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування САМ-системи ESPRIT для автоматизованої підготовки виробництва та розробки високоефективних технологічних маршрутів. Впровадження такого підходу у практику дає змогу значно підвищити продуктивність, зменшити витрати на інструмент, підвищити якість продукції та конкурентоспроможність підприємства загалом.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ ПРОФІЛЬНИХ ПАЗІВ СТРУЖКОЮ ПІД ЧАС ФРЕЗЕРУВАННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Однією з обов'язкових умов підвищення продуктивності та якості обробки різанням є своєчасне видалення стружки з робочої зони, так як при повторному попаданні відокремленої стружки в зону різання має місце інтенсивне зношування, збільшення енерговитрат різання та ряд інших негативних явищ. Особливу актуальність видалення стружки має при фрезеруванні закритих профільних пазів (Т-подібних, типу "ластівчин хвіст"), фігурних лабіринтів та ін., оскільки простір паза в силу його замкнутості досить швидко заповнюється відокремленою стружкою, яка при подальшому стисканні має силовий вплив на різання.

У той же час, у відомих роботах у цій галузі процеси накопичення та заповнення закритих пазів відокремленою стружкою не розглядаються. Тому дослідження, спрямовані на вивчення цих процесів з метою створення ефективних пристроїв для своєчасного видалення стружки з робочої зони, є дуже актуальними.

Для цього створено математичну модель накопичення стружки, яка базується на фізичному процесі переміщення і накопичення стружки в процесі фрезерування. Так у початковий момент часу, коли вільний простір паза ще не заповнений відокремленою стружкою, елемент стружки викидається (під дією сил, що мають місце під час робочого процесу) з простору між зубцями на певну відстань. Далі, вільний простір паза заповнюється стружкою, що відокремлюється. Оскільки щільність стружки істотно менша за щільність матеріалу оброблюваної заготовки (сталь, чавун та ін), то заповнення вільного простору паза може відбуватися досить швидко. Швидкість цього процесу визначатиметься геометричними розмірами паза, значенням відстані переміщення стружки, а також значенням об'ємного коефіцієнта (коефіцієнта розпушування стружки). Результати моделювання у діапазоні зміни конструктивних та режимних параметрів, рекомендованих стандартами для Т-подібних пазів показують, що заповнення вільного простору паза відбувається при значенні $L = 1,0 \dots 1,3$ см у разі обробки сталевих заготовок і $L = 6 \dots 8$ см при обробці чавунних заготовок. При подальшій реалізації робочого процесу в цьому випадку обсяг відокремленої стружки перевищує обсяг вільного простору, що призводить до стиснення стружки.

Висновки:

1. Розроблено методику аналізу процесу заповнення стружкою закритих профільних пазів при їх фрезеруванні.

2. Аналіз робочого процесу фрезерування Т-подібних пазів, виконаний на основі розробленої методики в діапазоні, рекомендованому чинними стандартами, показує:

- у всіх розглянутих випадках має місце стиск стружки, розташованої в пазу, що визначає з її боку підпір елементам стружки, що знаходяться у просторі між зубцями фрези;

- значення сил підпору такі, що самовидалення елемента стружки із простору між зубцями фрези виключається.

3. Для забезпечення продуктивної та якісної обробки Т-подібних пазів в діапазоні, рекомендованому стандартами, необхідне прикладення додаткової примусової сили до відокремленої стружки.

Ломанов К.О.,¹ аспірант,
klomanov0320@gmail.com
Головко М.О.,² аспірант,
m.o.holovko@khai.edu

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ КІЛЬКОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

²Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному машинобудівному виробництві, особливо в умовах дрібносерійного та багатомасштабного випуску продукції, питання забезпечення стабільної якості обробки деталей набуває все більшої актуальності. Зростаючі вимоги до точності, надійності та повторюваності продукції вимагають запровадження нових підходів до контролю технологічних процесів. Водночас традиційні статистичні методи часто виявляються недостатньо ефективними в умовах обмеженої кількості контрольних даних і швидкозмінного середовища обробки.

Зважаючи на це, у представленому дослідженні запропоновано вдосконалений підхід до діагностики якості токарної обробки із використанням методу кумулятивних сум (CUSUM) [1]. На відміну від класичних методик, що ґрунтуються на аналізі моментних або групових характеристик параметрів, підхід на базі CUSUM дозволяє враховувати динаміку процесу та оперативно виявляти навіть незначні відхилення від номіналу. Така властивість є надзвичайно цінною для оперативного прийняття рішень у виробничому середовищі з високою мінливістю [2].

Об'єктом дослідження виступив процес механічної обробки фланця колінчастого вала зі сталі 20Х на токарному верстаті з числовим програмним керуванням 16K20Ф3. Було здійснено 25 вибірок по 5 деталей у кожній, під час яких фіксувалися відхилення розмірів від номінального значення. На основі цих даних побудовано графіки кумулятивних сум, які дозволили виявити тенденції зміни якості процесу [3].

З метою комплексної оцінки якості обробки запропоновано інтегральний показник якості продукції, що враховує вагомість окремих параметрів – таких як точність, шорсткість поверхні, просторові відхилення, ступінь наклепу та залишкові напруги. Математична модель побудована на основі середньозваженого показника, що дозволяє об'єднати різноманітні параметри в єдиний узагальнений критерій якості. При цьому вагові коефіцієнти було визначено з урахуванням статистичної дисперсії кожного параметра та його значущості для функціонування готового виробу [3].

Апробація методики продемонструвала, що інтегральний показник якості корелює з поведінкою кумулятивної кривої та є ефективним інструментом для кількісної оцінки стану процесу. Зокрема, було встановлено, що при переході від задовільно налаштованого до точно відрегульованого процесу, показник якості набуває чітко вираженого зростання. Це дозволяє використовувати даний підхід не лише для фіксації поточного стану, а й як засіб порівняльного аналізу різних технологічних режимів [3].

Візуалізація результатів у вигляді еталонної CUSUM-карти, розробленої в межах дослідження, дозволяє впроваджувати систему контролю безпосередньо на виробничих ділянках. Така карта забезпечує зручний інтерфейс для інженера-технолога, даючи змогу швидко ідентифікувати відхилення та здійснювати коригування процесу в режимі реального часу.

Таким чином, поєднання методу кумулятивних сум з математично обґрунтованим підходом до розрахунку комплексного показника якості створює підґрунтя для формування адаптивної системи контролю технологічних процесів, що є надзвичайно важливо для сучасного гнучкого виробництва.

У підсумку, слід зазначити, що запропонована методика:

- забезпечує високу чутливість до змін параметрів обробки;
- є придатною до умов обмеженої статистичної інформації;
- дозволяє об'єднувати множину показників у єдиний інформативний критерій;
- має практичну цінність для інтеграції у виробничі процеси дрібносерійного типу.

Запропонований підхід є перспективним напрямом розвитку систем статистичного управління якістю в машинобудуванні, орієнтованому на індивідуалізоване виробництво, адаптацію до змін і цифрову трансформацію промисловості.

Науковий керівник: д.т.н., професор Купріянов О.В., PhD Хом'як Е.А.

Список використаних джерел

1. Shafae M.S., Dickinson R.M., Woodall W.H., Camelio, J.A. Cumulative sum control charts for monitoring Weibull-distributed time between events. *Quality and Reliability Engineering International*. 2015. №31 (5). P. 839–849. DOI: 10.1002/qre.1643.
2. Imran M., Sun J., Zaidi F.S., Abbas Z., Nazir H. Z. () 'Multivariate cumulative sum control chart for compositional data with known and estimated process parameters. *Quality and Reliability Engineering International*. 2022. №38 (5). P. 2691–2714. DOI: 10.1002/qre.3099.
3. Ломанов К. О., Головка М. О. Статистичні методи оцінювання якості технологічних процесів при обмеженій кількості інформації. *Машинобудування*. 2025. Вип. 35. С. 36-45. DOI: 10.26565/2079-1747-2025-35-04

A REVIEW OF ADAPTIVE FEEDRATE PLANNING STRATEGIES IN FREE-FORM SURFACE MILLING

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Free-form surfaces are widely used in power engineering (such as compressor and turbine blades), the automotive and aerospace industries, and in the production of forming tools (dies and molds). Free-form surface milling (FFSM) is a labor-intensive task that requires maintaining constant and proper contact between the tool and the surface being machined. The irregular geometry of such surfaces creates difficulties in maintaining the necessary machining conditions [1].

In FFSM, the tool and workpiece contact is point-based, with the contact point continuously changing, which alters the tool's effective radius and, in turn, the instantaneous cutting speed and cutting force during machining. This leads to changes in the overall metal cutting mechanism and significantly differs from conventional flat or cylindrical milling processes [1].

Since most free-form surfaces are used in high-tech structural products, their machining demands high precision and surface quality - something that is hard to achieve using traditional methods for generating CNC programs [1].

This is because milling can create relatively high cutting forces, which become a source of deformation and vibration, reducing machining quality. There are transient deformations occurring near the cutting zone, which cause positioning errors, and deformations caused by residual stresses, which redistribute as material is removed. Simultaneous vibration of the tool and workpiece leads to undesirable vibration marks and increased surface roughness. Therefore, eliminating deformations and vibrations during FFSM contributes to improved machining quality [2].

Thus, despite a large number of publications on the topic, the development and refinement of FFSM technologies remains relevant in modern industry. One of the key areas for increasing the efficiency, accuracy, and quality of FFSM is real-time adaptive feedrate planning [3].

This work presents a review of the main strategies for adaptive feedrate planning, classifying approaches based on core principles such as toolpath characteristics, cutting forces, material removal rate, etc.

1. Geometry-Based Strategies

Geometry-based strategies adjust the feedrate according to the curvature of the toolpath, the slope of the surface, and other geometric features of the surface and machining path. These methods aim to ensure smooth movement, reduce tool deflection, and prevent abrupt changes in direction, speed, acceleration, and jerk, which can overload the tool and increase kinematic errors.

In high-speed milling of free-form surfaces, surface quality largely depends on the smoothness of toolpaths. Sudden changes in speed, acceleration, or jerk can cause vibrations, drive overload, reduced accuracy, premature tool wear, or even part damage.

A modern approach to improving path smoothness is using splines — curves that provide continuity not only in position but also in differential characteristics (velocity, acceleration, jerk). Currently, third- and fifth-degree B-splines and Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) are most commonly used for CNC path generation.

Curvature-aware methods reduce the feedrate in high-curvature areas to maintain tool stability.

Cusp height control ensures consistent surface quality by adjusting the feedrate to maintain a constant cusp height on inclined surfaces.

These strategies are typically calculated in advance in offline mode and offer a good balance between simplicity and efficiency.

2. Force and Engagement-Based Strategies

Adaptive feedrate control based on cutting force and tool engagement is a strategy where feedrate is adjusted in real time based on the changing contact area between the tool and workpiece. Cutting force is the force with which the cutting edge acts on the material and depends on feedrate, depth and width of cut, engagement angle, and cutting speed. Contact area reflects the arc length of the cutter engaged with the workpiece or the number of cutting teeth in contact. It varies with material allowance, toolpath turns, corners, and entry/exit points. With the same feedrate but different contact areas, the cutting force and tool load change. The goal of this strategy is to maintain optimal tool load, ensure process stability, and prevent overloads. When the contact area increases, the feedrate is reduced; when it decreases, the feedrate is increased to maximize tool utilization.

Typical approaches include: Constant Tool Engagement (CTE) – maintains a constant engagement angle; Material Removal Rate (MRR) – keeps a constant rate of material removal; Constant Chip Load (CCL) – maintains constant chip thickness per tooth; Force-Based Feedrate Control – uses a controller that measures or predicts cutting force and adjusts feedrate in real time.

3. Physics-Based and Mechanistic Models

Mechanistic feedrate control is an approach in which tool feedrate during CNC machining is managed using physical-mathematical (mechanistic) models describing the cutting process. Unlike empirical or training methods, the mechanistic approach directly simulates the cutting process using formulas that depend on real physical parameters: tooth feed, depth of cut, cutting edge angles, material properties, and cutting speed. The goal is to calculate when the load increases and reduce the feedrate adaptively — or increase it when the load decreases.

These methods often provide high-precision control but may require extensive modeling and calibration.

4. Sensor-Integrated Real-Time Feedback

Sensor-based adaptive control regulates feedrate in real time based on actual machining conditions.

Force sensors (strain gauges, dynamometers) directly measure cutting forces to adjust feedrate. Spindle power and motor current sensors detect cutting load and adjust speed dynamically. Vibration sensors (accelerometers) detect tool/workpiece oscillations and reduce feedrate during unstable conditions. Temperature sensors monitor the cutting zone to prevent overheating and tool failure. Sound sensors (microphones) detect acoustic emissions to identify tool wear or mechanical damage (e.g., cracks). Encoders and tachometers measure axis position and speed, used to control feedrate based on motion parameters.

Sensor-based adaptive control is critical for machining hard-to-cut materials and high-precision components. These strategies rely on fast and accurate feedback loops.

5. Learning-based strategies

Learning-based feedrate strategies predict optimal feedrates using prior machining data and apply machine learning or trainable models. These methods can: predict problems before they occur, adjust feedrate based not only on current but also previous sessions, improve FFSM efficiency across various materials and tools. For example, machine learning methods such as mathematical regression are used to predict load or tool wear, classification is used to detect deviations and hazardous conditions, and reinforcement learning is used to train based on feedback from the processing results. Training enables the development of feed rate control methods, which are gradually improved through trial and error.

These strategies are highly valuable, especially in batch machining of complex parts, machining expensive materials (e.g., titanium, Inconel), and integration with digital twins and smart manufacturing systems.

6 Hybrid Strategies

Hybrid strategies combine two or more methods to overcome the limitations of individual approaches.

Geometry-based planning with sensor integration are using precomputed paths adjusted in real time based on sensor feedback.

Hybrid solutions combining mechanistic models and learning systems integrate force models with learning algorithms to achieve both accuracy and adaptability.

Such systems are becoming increasingly accessible with advances in real-time computing and intelligent control platforms.

In conclusion, adaptive feedrate planning is crucial for optimizing the milling of complex free-form surfaces. While earlier strategies focused on geometry and offline models, the field is now evolving to include real-time sensors and machine learning. Hybrid methods that integrate physical modeling with other strategies show great promise in achieving both accuracy and flexibility. As digital manufacturing advances, adaptive feedrate control will play a key role in the implementation of modern high-speed free-form surface milling systems.

References

1. Mali, Rahul A. A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade / Rahul A. Mali, T.V.K. Gupta, J. Ramkumar // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 6. – P. 132–167. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>.
2. Yan, B. Towards high milling accuracy of turbine blades: A review / Boling Yan, Yanpeng Hao, Lida Zhu, Changfu Liu // Mechanical Systems and Signal Processing/ – 2022. – Vol. 170. – Article 108727. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108727>
3. Kurt, M Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future directions / M. Kurt, E. Bagci // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 55. – P. 1037–1067. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3131-3>

7. ПРОЦЕСИ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.37/.39.002.2:621.9.048.7, 620.3

Баранов О.О., д.т.н., професор
O.Baranov@khai.edu

Бреус А.О., к.т.н., доцент
A.Breus@khai.edu

Абашин С.Л., к.т.н.
S.Abashin@khai.edu

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ МЕТАЛ-ОКСИДНИХ ТА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОСТРУКТУР ДІЄЮ ПОТОКІВ ПЛАЗМИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Наноструктури оксидів металів і вуглецеві наноматеріали (рис. 1) становлять одні з найперспективніших об'єктів у сучасній нанонауці завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, що істотно відрізняються від властивостей об'ємних аналогів [1, 2]. Їхня висока питома площа поверхні, квантово-розмірні ефекти, активна поверхнева хімія та структурна керованість відкривають широкі можливості для використання у багатьох галузях науки й техніки. Особливий інтерес становлять наноструктуровані оксиди металів, зокрема на основі TiO_2 , ZnO , CuO , Fe_2O_3 , SnO_2 , які проявляють напівпровідникову поведінку, оптичну прозорість, здатність до фотокаталізу та активну участь у редокс-процесах. Це зумовлює їхню ефективність у розкладанні органічних забрудників, фотохімічному розщепленні води, детекції газів, зберіганні й перетворенні енергії, а також у створенні біосумісних покриттів з антибактеріальними властивостями.

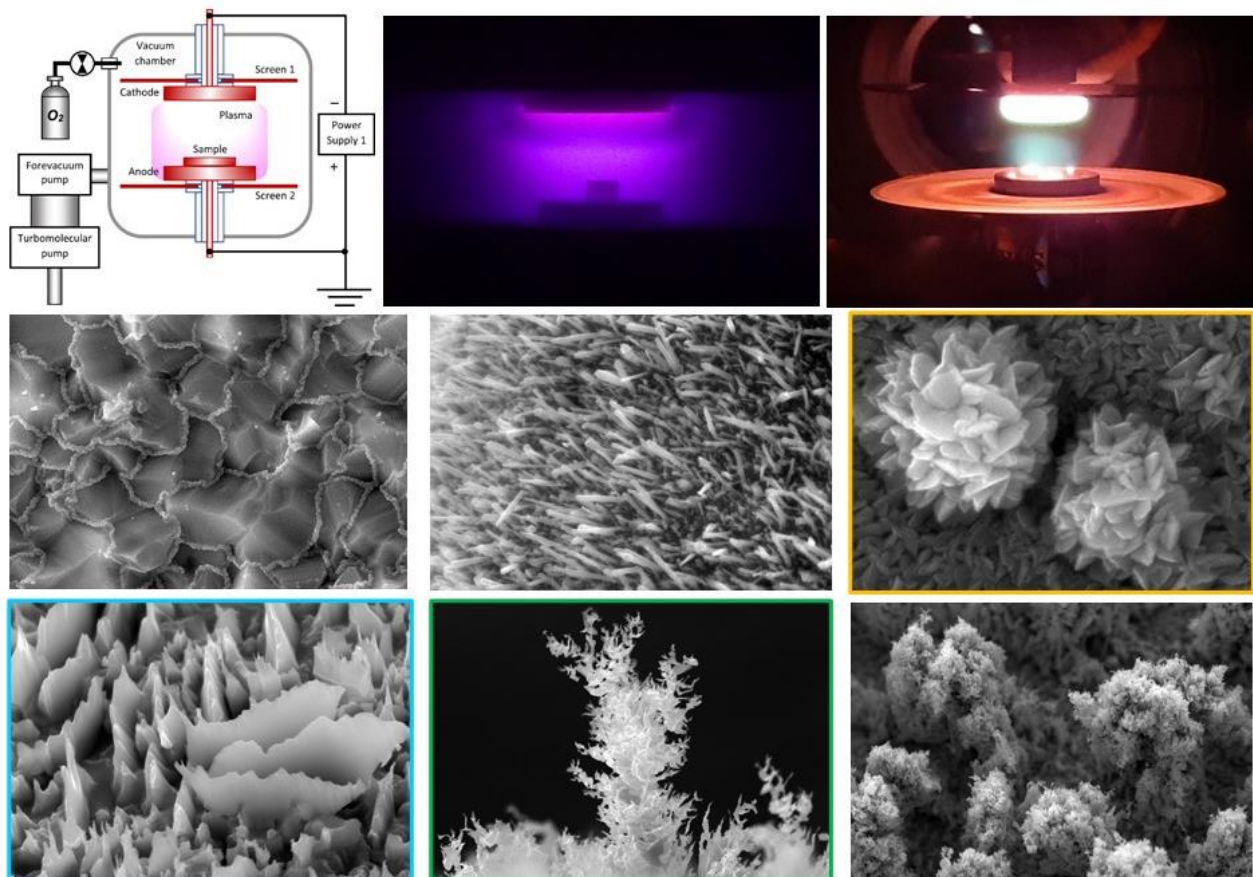


Рис. 1. Різноманітня наноструктур оксиду міді, синтезованих за допомогою плазми

У свою чергу, вуглецеві наноструктури, включно з графеном, нанотрубками та аморфним вуглецем, відзначаються надзвичайно високою електропровідністю, механічною міцністю, хімічною інертністю та термічною стабільністю. Ці характеристики роблять їх придатними для впровадження в нанoeлектроніку, сенсорні системи, гнучку електроніку, а також у системи зберігання енергії й електрокаталізу. Крім того, завдяки великій площі поверхні й можливості функціоналізації, вуглецеві матеріали широко використовуються як сорбенти у водоочищенні та екологічних технологіях. Особливу увагу останнім часом привертають гібридні структури на основі оксидів металів і вуглецю, які демонструють синергетичний ефект, що дозволяє покращити характеристики приладів для фотоелектрохімічного перетворення енергії, створення сенсорів і систем гетерогенного каталізу. Ключовим фактором підвищення ефективності таких матеріалів є здатність керувати їх розмірами, морфологією, кристалічністю й хімічною активністю поверхні на етапі синтезу. Застосування плазмових методів, особливо за умов низького тиску, дозволяє досягти високого ступеня контролю над параметрами наноструктур, забезпечуючи стабільність і відтворюваність процесів. Отже, розроблення та вдосконалення ефективних, екологічно чистих і масштабованих методів синтезу оксидних і вуглецевих наноматеріалів має вирішальне значення для подальшого розвитку інновацій у сферах енергетики, екології, електроніки та біомедицини.

Тліючий розряд за умов низького (1–100 Па) або середнього (100–1000 Па) тиску є одним із найпоширеніших джерел нерівноважної плазми з густиною електронів 10^{14} – 10^{16} м⁻³, який широко застосовується для отримання наноструктурованих матеріалів завдяки простоті реалізації, стабільності та високій керованості параметрів [3, 4]. Його застосування у синтезі наноструктур оксидів металів та вуглецевих матеріалів ґрунтується на здатності генерувати інтенсивні потоки іонів, електронів, радикалів і активних атомів, що беруть участь у формуванні нових фаз на поверхні підкладки або в об'ємі матеріалу. Однією з ключових особливостей тліючого розряду є наявність чітко виражених просторових зон, зокрема катодного падіння, негативного свічення та позитивного стовпа. Зона біля катода, де відбувається прискорення іонів до високих енергій, є особливо важливою для наноструктурного синтезу, оскільки саме тут реалізується інтенсивне іонне бомбардування підкладки. Це стимулює утворення дефектів, локальне нагрівання та ініціацію росту наноструктур завдяки активації поверхневих дифузійних процесів. У випадку синтезу метал-оксидних наноструктур, тліючий розряд за участі реактивних газів, таких як кисень, сприяє утворенню активних форм кисню – атомів, озону, а також іонізованих частинок, які ефективно взаємодіють з металевою поверхнею або атомами парів металу, утворюючи оксидні фази. Низька температура газової фази водночас із локально високою енергією іонів дозволяє здійснювати процес на термочутливих підкладках, забезпечуючи кристалізацію або наноформування оксидних матеріалів без потреби в зовнішньому нагріванні. Для вуглецевих наноструктур тліючий розряд забезпечує ефективне розщеплення вуглеводневих молекул (метану, ацетилену тощо), створюючи потік активних вуглецевих радикалів, які адсорбуються на поверхні, формуючи шари аморфного або частково орієнтованого вуглецю. Залежно від параметрів розряду (напруга, струм, відстань між електродами, тиск), можливе формування нанотрубок або наночастинок із контролем морфології та хімічної структури. Серед переваг тліючого розряду варто виокремити простоту апаратного оформлення, стабільність розряду, низьке енергоспоживання, здатність працювати у великих об'ємах, а також точний контроль над енергією частинок, що взаємодіють із поверхнею. Іонне бомбардування, притаманне цьому типу плазми, дозволяє реалізовувати синтез з елементами нанолітографії або анізотропного росту. Втім, до недоліків застосування тліючого розряду належить обмеження по масштабованості при покритті великих поверхонь через нерівномірність щільності плазми, а також ерозія електродів при довготривалих процесах, що може спричинити небажане легування або забруднення продуктів синтезу. Крім того, через однорідну геометрію розряду іноді складно забезпечити високу просторову селективність або інтегрувати процес у високопродуктивні технології без додаткових модифікацій джерела.

Загалом, тліючий розряд низького та середнього тиску залишається надзвичайно корисним інструментом у дослідженнях плазмохімічного синтезу наноматеріалів завдяки поєднанню простоти, відтворюваності та здатності генерувати контрольовані потоки енергетично насичених частинок, які визначають механізми росту та морфологію наноструктур.

Радіочастотний (RF) розряд є ефективним джерелом неравноважної плазми, що широко використовується для синтезу наноструктурованих матеріалів, зокрема оксидів металів і вуглецевих наночастинок [5, 6]. Його особливість полягає у використанні змінного електричного поля високої частоти (зазвичай 13,56 МГц), що дозволяє збуджувати плазму без необхідності прямого електричного контакту з електродами, отримуючи плазму густиною електронів 10^{15} – 10^{17} м⁻³. Це надає змогу обробляти діелектричні підкладки або застосовувати конфігурації з ізольованими електродами, що суттєво розширює сферу його використання. За умов низького або середнього тиску, RF розряд забезпечує стабільне формування нерівноважної плазми з високою концентрацією активних частинок – електронів, іонів, атомарних фрагментів і радикалів. Однією з важливих переваг RF розряду є можливість незалежного контролю над потужністю, прикладеною до плазми, та температурою газової фази, що дозволяє керувати кінетикою росту наноструктур без надмірного нагрівання підкладки. Це особливо важливо для процесів, де вимагається висока точність формування наночастинок при мінімальному термічному навантаженні. У випадку синтезу метал-оксидних наноструктур, RF розряд часто використовується у реактивних середовищах, що містять кисень або інші окислювачі. Високоенергетичні електрони ініціюють ефективне збудження та іонізацію молекул, створюючи потік реактивних форм кисню, здатних окиснювати металеві пари або поверхні. Це дозволяє досягати формування наноструктурованих оксидів із контрольованою морфологією, високою чистотою та бажаними електрофізичними характеристиками. При синтезі вуглецевих наноматеріалів, RF розряд забезпечує дисоціацію вуглеводневих газів, утворюючи активні карбонові види, які конденсуються на підкладці у вигляді вуглецевих наноплівочок, наночастинок, нанотрубок або наностірок. Залежно від геометрії камери, потужності розряду та складу газової фази, можна отримувати як аморфні, так і частково впорядковані вуглецеві структури. Крім того, RF розряд дозволяє використовувати схеми електричного живлення, в яких можна окремо регулювати потенціал підкладки для впливу на енергію іонного бомбардування, що забезпечує додаткову гнучкість у формуванні морфології. Серед переваг RF розряду варто відзначити його здатність до генерації плазми в діелектричних реакторах, високу стабільність, рівномірність плазмового фронту на великих площах, а також можливість тонкого регулювання параметрів осадження або травлення наноматеріалів. Це робить RF-плазму надзвичайно придатною для створення тонких плівок, нанопокриттів і тривимірних наночастинок. Проте до недоліків RF розряду можна віднести складність реалізації систем з високою потужністю без утворення паразитних ефектів (наприклад, самозбудження), обмежену щільність іонів у порівнянні з деякими іншими типами плазми (наприклад, СВЧ-плазмою), а також необхідність ретельного контролю над температурним режимом при обробці чутливих матеріалів. У випадку складних композицій або багатокомпонентних середовищ можуть виникати труднощі з відтворюваністю фази та хімічного складу кінцевого наноматеріалу. У підсумку, RF розряд при низькому та середньому тиску є надзвичайно універсальним інструментом для плазмохімічного синтезу наноматеріалів. Його унікальні властивості відкривають широкі можливості для формування високочистих, морфологічно контрольованих метал-оксидних та вуглецевих наноструктур із перспективою застосування у фотоелектроніці, каталізі, сенсоріці та енергетичних системах нового покоління.

Мікрохвильовий (MW) розряд є потужним джерелом нерівноважної плазми, який активно використовується для синтезу наноматеріалів завдяки високій густині енергії, здатності до глибокого збудження молекул та високій концентрації активних частинок [7, 8]. Зазвичай генерація мікрохвильової плазми здійснюється на частоті 2,45 ГГц, що дозволяє ефективно збуджувати газову суміш без безпосереднього контакту з електродами, завдяки чому плазма є практично «безелектродною». Такий характер розряду знижує ризик

забруднення синтезованих наноструктур продуктами ерозії та забезпечує високу чистоту процесу. При низькому та середньому тиску мікрохвильова плазма формується як компактне або розширене джерело з високою густиною електронів (до 10^{19} м^{-3}), що дозволяє реалізовувати інтенсивні реакції дисоціації, іонізації та рекомбінації з утворенням великої кількості активних частинок. Однією з характерних особливостей MW плазми є її висока температурна неоднорідність: попри те, що електрони мають дуже високу температуру (кілька еВ), температура іонів і нейтральних частинок може залишатися близькою до кімнатної, що створює сприятливі умови для низькотемпературного синтезу наноструктур. У випадку синтезу метал-оксидних наноструктур, MW розряд дозволяє досягти високого ступеня окиснення завдяки генерації атомарного кисню, озону та інших окисдантів у кисневмісному середовищі. Ці активні компоненти сприяють утворенню нанокристалічних оксидів металів із заданими розмірами, морфологією та фазовою чистотою. Завдяки інтенсивному енергетичному впливу MW плазми також можливе плазмохімічне відновлення, нанесення оксидів на поверхні або гібридизація з іншими нанофазами. Для вуглецевих наноструктур, зокрема нанотрубок, графеноподібних плівок та наночастинок, мікрохвильова плазма виступає як ефективний інструмент для активної дисоціації вуглеводневих молекул з подальшою осадкою вуглецевих кластерів на підкладку. Потужність та густина плазми MW розряду забезпечують швидкий ріст нанофаз, а низький вміст домішок гарантує високу структурну якість отриманих матеріалів. Серед переваг MW розряду варто відзначити надзвичайно високу щільність плазми, рівномірність збудження, можливість масштабування процесу, а також мінімізацію забруднення за рахунок безелектродної конфігурації. Завдяки цим характеристикам MW плазма є особливо перспективною для чистих технологій, включаючи електроніку, фотокаталіз та енергетику. Водночас, недоліками застосування MW розряду є складність апаратної реалізації та контролю процесу, висока вартість мікрохвильових генераторів, необхідність ретельного узгодження між параметрами резонатора та характеристиками газового середовища. Крім того, формування плазми в локалізованій зоні (наприклад, у плазмовому факелі або біля антени) може ускладнювати рівномірне покриття великих поверхонь без використання додаткових систем перенесення або розширення зони розряду. Загалом, MW розряд при низькому і середньому тиску демонструє великий потенціал як високоефективне джерело плазми для керованого синтезу оксидних і вуглецевих наноструктур. Його унікальні характеристики – висока чистота, інтенсивність плазмової дії та відтворюваність – роблять його конкурентоспроможним для промислового впровадження у сфері нанотехнологій, де критично важливо забезпечити точність, стабільність та масштабованість процесів формування нанофаз.

Узагальнені результати проведеного аналізу наведені у таблиці 1. Отже, для цілей синтезу наноструктурованих оксидів металів та вуглецевих наноматеріалів найчастіше застосовуються три основні типи низькотемпературної плазми: тліючий розряд постійного струму (DC), радіочастотний розряд (RF) та мікрохвильовий розряд (MW) [9, 10]. Кожен із цих типів має характерні особливості генерації плазми, які визначають специфіку взаємодії активних частинок із поверхнею підкладки та впливають на морфологію, фазовий склад і структурні характеристики отриманих нанофаз. DC тліючий розряд формує нерівноважну плазму при низьких або середніх тисках (1–500 Па) за рахунок прикладеної постійної напруги. Його дія локалізована переважно в зоні катодного падіння, де іонне бомбардування забезпечує локальне нагрівання, активацію поверхні та ініціацію росту наноструктур. Основною перевагою DC плазми є її простота, відносно низька вартість та можливість реалізації у вакуумних системах з мінімальним енергоспоживанням. Проте недоліком є ерозія електродів, яка може призводити до забруднення матеріалів домішками, а також нерівномірність плазмового фронту на великих площинах. RF розряд функціонує на частоті 13,56 МГц і дозволяє створювати стабільну плазму за відсутності прямого електричного контакту з оброблюваною поверхнею. Завдяки цьому він є сумісним із діелектричними підкладками та дозволяє незалежно контролювати потужність збудження і енергію іонного потоку через використання певних схем електричного живлення. Це відкриває можливості для точного контролю над умовами росту наноструктур.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика DC, RF та MW джерел плазми в контексті синтезу наноматеріалів

Параметр/ характеристика	DC (тліючий розряд)	RF (радіочастотний розряд)	MW (мікрохвильовий розряд)
Тип живлення	Постійна напруга (~100–1000 В)	Змінна напруга високої частоти (13,56 МГц)	Мікрохвильове випромінювання (2,45 ГГц)
Тип плазми	Нерівноважна, з низькою температурою газу	Нерівноважна, зі змінним потенціалом підкладки	Нерівноважна плазма високої щільності
Робочий тиск	Низький–середній (1–500 Па)	Низький–середній (1–500 Па)	Низький–середній (5–1000 Па)
Переважаючий механізм впливу	Іонне бомбардування у катодній області	Комбінований: плазмохімія + іонне травлення	Потужне електронне збудження, висока густина активних частинок
Конфігурація електродів	Два електроди (прямий контакт)	Один або два електроди, можлива безелектродна схема	Безелектродна (антена або хвилевід)
Можливість обробки діелектриків	Обмежена	Висока	Висока
Здатність до масштабування	Помірна, з проблемами однорідності	Висока, з можливістю рівномірного покриття	Висока, але потребує складної апаратури
Чистота процесу (ризик забруднення)	Можливе забруднення від ерозії катода	Помірне (залежить від конфігурації)	Дуже висока (безелектродна схема мінімізує домішки)
Контроль над параметрами	Обмежений	Добре контрольований	Високий рівень керуваності через параметри генератора
Типові матеріали для синтезу	CuO, ZnO, аморфний або кристалічний вуглець	TiO ₂ , SiO ₂ , CNT, гібридні наноструктури	Графен, вуглецеві нанотрубки, нанокристалічні оксиди
Переваги	Простота, низька вартість	Можливість обробки діелектриків	Висока густина і чистота плазми
Недоліки	Ерозія електродів, неоднорідність плазми	Складність узгодження параметрів, помірна густина плазми	Висока вартість, складність у керуванні плазмовою зоною

RF плазма характеризується високою гнучкістю в конфігурації, проте має дещо меншу густину плазми порівняно з MW джерелами. MW плазма, що генерується на частоті 2,45 ГГц, забезпечує найвищу густину електронів серед розглянутих типів, що дозволяє ефективно дисоціювати та іонізувати газову суміш навіть за низьких тисків. Однією з ключових переваг MW розряду є безелектродна конфігурація, яка значно знижує ризик забруднення продуктів синтезу. Висока чистота, швидкість росту нанofаз та можливість масштабування роблять мікрохвильову плазму привабливою для промислового застосування. Водночас апаратна складність, висока вартість устаткування та потреба у резонансному налаштуванні можуть обмежувати її використання в умовах лабораторного синтезу.

Узагальнено, тліючий розряд доцільний для простих експериментів та локального оброблення поверхонь; RF плазма забезпечує гнучкість та контроль у синтезі нанofаз на діелектриках; MW плазма є найбільш продуктивною для високочистих наноструктур, зокрема у сфері електроніки, каталізу та енергетичних матеріалів. Вибір типу розряду повинен ґрунтуватися на вимогах до морфології, складу та масштабу синтезу.

Список використаних джерел

1. Vertically-oriented graphene nanowalls: Growth and application in Li-ion batteries / Q. Yang, J. Wu, S. Li, L. Zhang, J. Fu, F. Huang, Q. Cheng // *Diamond and Related Materials*. – 2019. – No. 91. – P. 54–63.
2. Nanoengineered Carbon-Based Interfaces for Advanced Energy and Photonics Applications: A Recent Progress and Innovations / I. Levchenko, O. Baranov, C. Riccardi, H. E. Roman, U. Cvelbar, E. P. Ivanova, M. Mohandas, P. Ščajev, T. Malinauskas, S. Xu, K. Bazaka // *Advanced Materials Interfaces*. – 2023. – Vol. 10, Iss. 1. – Article No. 2201739. – p 1–34. <https://doi.org/10.1002/admi.202201739>
3. Multi-Pin DC Glow Discharge PECVD for Uniform Growth of Vertically Oriented Graphene at Atmospheric Pressure / Z. Bo, W. Ma, P. Wang, E. Wu, W. Yang, K. Yu, X. Zhang, J. Yan, K. Cen // *Physica Status Solidi B*. – 2014. – No. 251. – P. 155–161.
4. Catalytic Growth of Carbon Nanostructures in Glow Discharge / A. Breus, S. Abashin, Lukashov, O. Serdiuk, O. Baranov // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2022. – P. 375–383. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0>
5. Synthesis of carbon nanosheets by inductively coupled radio-frequency plasma enhanced chemical vapor deposition / J. Wang, M. Zhu, R. A. Outlaw, X. Zhao, D. M. Manos, B. C. Holloway // *Carbon*. – 2004. – No. 42. – P. 2867–2872.
6. Baranov O. Towards a highly-controllable synthesis of copper oxide nanowires in radio-frequency reactive plasma: fast saturation at the targeted size / O. Baranov, G. Filipič, U. Cvelbar // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2019. – Vol. 28, Iss. 8. – Article No. 084002. – p. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aae12e>
7. Substrate temperature effect on the growth of carbon nanowalls synthesized via microwave PECVD / S. Y. Kim, W. S. Choi, J.-H. Lee, B. Hong // *Materials Research Bulletin*. – 2014. – No. 58. – P. 112–116.
8. Plasma-driven 1D to 2D nanomaterial phase transition / M. Košíček, O. Baranov, J. Zavašnik, U. Cvelbar // *Materials Today Nano*. – 2025. – Iss. 31. – Article no. 100645. – p. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2025.100645>
9. Lieberman, M. A. Principles of Plasma Discharges for Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. – New York: Wiley Interscience. – 2005. – 757 p.
10. Recent innovations in the technology and applications of low-dimensional CuO nanostructures for sensing, energy and catalysis / O. Baranov, K. Bazaka, T. Belmonte, C. Riccardi, E. Roman, H. M. Mohandas, S. Xu, U. Cvelbar, I. Levchenko // *Nanoscale Horizons*. – 2023. – Vol. 8, Iss. 5. – p. 568–602. <https://doi.org/10.1039/D2NH00546H>

Басов В.В.,¹ м.н.с
Viktor.Basov@mit.khpi.edu.ua
Трубін Д.В.,¹ аспірант
d.trubin05@gmail.com
Міколай Косцінський,^{2,3} PhD
mikolaj.koscinski@up.poznan.pl

ОСОБЛИВОСТІ СВІТЛОВІДБИВАННЯ ЛАЗЕРНО-ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ СТАЛІ AISI 321

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

²Познанський університет природничих наук, Польща

³Університет імені Адама Міцкевича, Польща

Інтенсифікація оптичних властивостей функціональних поверхонь, зокрема зниження відбивної здатності у видимому діапазоні, є актуальним завданням при створенні сенсорних елементів, оптоелектроніки та систем керованого поглинання світла. Перспективним підходом до вирішення зазначеного завдання є застосування фемтосекундного лазерного структурування поверхонь, яке забезпечує одночасне формування мікрорельєфу і хімічну модифікацію металевої основи без використання токсичних реагентів.

У дослідженні розглянуто вплив фемтосекундної лазерної обробки на формування низьковідбивних поверхонь із нержавіючої сталі AISI 321. Для комплексної характеристики морфологічних та оптичних змін використовували спектрофотометрію, рентгенівську фотоелектронну спектроскопію (XPS), енергетично-дисперсійний рентгенівський аналіз (EDS), а також чисельне моделювання процесів поглинання. Встановлено, що процес лазерної обробки є двостадійним: на початковому етапі переважають хімічні модифікації (редукція оксидів Fe^{3+} до Fe^{2+} , десорбція кисню), тоді як при подальшому поглибленні мікроструктури формується розвинене геометричне затінення, яке домінує у зменшенні світловідбиття.

З'ясовано, що утворення плівки оксиду заліза (переважно Fe_2O_3) товщиною приблизно 100 нм призводить до зниження коефіцієнта відбиття до рівня 25%. Це підтверджено як експериментально, так і на основі аналітичних розрахунків згідно з рівняннями Френеля. Показано, що при комплексному впливі мікрорельєфу та хімічного складу можливе досягнення ще нижчих рівнів відбивання (~20%) за рахунок поєднання ефектів багатократного розсіювання та інтерференційного поглинання.

Аналіз спектральної еволюції топографії показав, що перехід від «сірої» до «чорної» поверхні супроводжується фрактальним ускладненням структури, підвищенням показника шорсткості (S_a , S_{vk} , S_k) та формуванням багатомасштабного мікрорельєфу. Зокрема, на стадії «чорної» поверхні характерна наявність як низькочастотних ($L_c > 30$ мкм), так і високочастотних компонент у спектрі шорсткості, що свідчить про мультифрактальну природу структури.

Отримані результати підтверджують, що фемтосекундна лазерна обробка є ефективним інструментом для створення абсорбуючих поверхонь без додаткової хімічної пасивації. Її застосування перспективне у галузях енергетики (покращення теплопоглинання), біомедицини (контроль оптичного сигналу), мікрофлюїдних систем, а також у військово-промислових розробках, де необхідна знижена оптична сигнатура поверхні.

Дослідження розроблено в межах НДР «Формування і трансформація періодичних нановуглецевовмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР №0124U000481), що виконується на замовлення МОН України.

Головко С.Т., аспірант

s.holovko@khai.edu

Бреус А.О., к.т.н., доцент

a.breus@khai.edu

Бочкарьов О.В., заступник

головного конструктора спец.

виробів АТ «ФЕД»

avbochkarev@fed.com.ua

ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ КЕРАМІЧНИХ ВТУЛОК ІЗ МАТЕРІАЛУ ВК-98 ДЛЯ НАНЕСЕННЯ НІКЕЛЬ-МОЛІБДЕНОВОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ІОНО-ПЛАЗМОВИХ ДВИГУНАХ ХОЛІВСЬКОГО ТИПУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Акціонерне Товариство «ФЕД», Україна

Іоно-плазмові двигуни холівського типу активно використовуються у космічних технологіях завдяки високій ефективності та можливості довготривалої роботи в умовах використання високоіонізованих газів (ксенон – як найефективніший). Одним із ключових конструктивних елементів цих двигунів є керамічні втулки — ізолятори, крізь які проходить робоче тіло, . Для можливості використання високотемпературних припоїв в процесі запаювання вузлів двигуна використовується нікель-молібденове покриття. Високотемпературна кераміка ВК-98 із вмістом Al_2O_3 понад 98% забезпечує покращені механічні та електроізоляційні характеристики у порівнянні з традиційною ВК-94-1, однак створює нові технологічні виклики при механічній обробці та підготовці до нанесення металевого шару. Зовнішній вигляд керамічних втулок із матеріалів ВК-98 та ВК-94-1 наведено на рис. 1.



а – втулка із ВК-98



а – втулка із ВК-94-1

Рис. 1. Зовнішній вигляд керамічних втулок із матеріалів ВК-98 та ВК-94-1

ВК-98 характеризується високою твердістю (9 за Моосом), низькою пористістю, відмінною термічною стабільністю і надзвичайно високою електроізоляцією, що робить її ідеальною для роботи в екстремальних умовах вакууму і високотемпературного іонного середовища. Водночас, мікроструктурна щільність і твердість матеріалу значно ускладнюють традиційні методи механічної обробки та підготовки поверхні. Підготовка поверхні втулок із

ВК-98 перед нанесенням нікель-молібденового шару вимагає ретельного підбору технологій. Основними труднощами обробки втулок із ВК-98 є високий опір обробці через надтверду структуру; ризик термічних тріщин при надмірному локальному нагріві; складність забезпечення рівномірної шорсткості поверхні та запаювання деталей вузлів; проблеми з контролем товщини, однорідності покриття та адгезії при вакуумному напиленні. Хоча ВК-94-1 є традиційним матеріалом для керамічних втулок, перехід на ВК-98 відкриває нові горизонти: менша ерозія, менша газопроникність, вища стабільність при впливі надвисоких температур. З розвитком прецизійних систем іонної тяги та мініатюризацією супутникових платформ (CubeSat, SmallSat) використання втулок із ВК-98 із нікель-молібденовим покриттям стає все більш актуальним. Збільшення ресурсу, зменшення маси та забезпечення стабільних характеристик упродовж тривалого періоду експлуатації — ключові фактори, що визначають доцільність впровадження цієї технології у серійне виробництво.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик кераміки: рожева ВК-94 або біла ВК-98

Параметр	Рожева ВК-94-1	Біла ВК-98
Вміст Al_2O_3 , %	≥ 94	$\geq 98.0\text{--}98.7$
Домішки	Cr_2O_3 (оксид хрому)	Мінімальні
Колір	Рожевий	Білий
Густина, г/см^3	~ 3.65	~ 3.90
Твердість за Моосом	8.5–9.0	9.0–9.5
Міцність на згин, МПа	$\sim 250\text{--}350$	$\sim 400\text{--}500$
Діелектрична проникність	9–10	9.8–10.2
Електроізоляція	Висока	Дуже висока
Теплопровідність, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\sim 25\text{--}28$	$\sim 30\text{--}40$
Температура експлуатації, $^{\circ}\text{C}$	До 1500	До 1750
Газопроникність	Середня	Дуже низька
Стійкість до плазмового середовища	Обмежена	Висока
Оброблюваність	Легша	Ускладнена
Ціна	Нижча	Вища

Таблиця 2 – Порівняння методів обробки поверхні для нанесення покриття.

Метод обробки	Рожева ВК-94-1	Біла ВК-98
Алмазне шліфування	Ефективне	Можливе, але складне та повільне
Піскоструминна обробка	Добре формує шорсткість	Може викликати мікротріщини
Лазерна мікроструктуризація	Обмежено застосовується	Ефективно при налаштуванні
Хімічне травлення	Частково ефективне	Майже неефективне
Іонне активування	Не завжди потрібне	Найефективніше
Полірування	Застосовується	Складне

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР НА РІЖУЧОМУ ІНСТРУМЕНТІ З КІБОРИТУ ПРИ ДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вступ

Сучасні тенденції в галузі високопродуктивної механічної обробки вимагають створення ріжучого інструменту, здатного ефективно працювати в умовах динамічних і ударних навантажень, високих температур, інтенсивного зношування. Надтверді матеріали, такі як кіборит, які поєднують високу твердість, зносостійкість та хімічну інертність, є перспективною основою для виготовлення інструментів нового покоління [1–3].

Однак відомо, що висока твердість таких матеріалів поєднується зі значним модулем пружності, що обумовлює їхню крихкість і обмежує використання при обробці заготовок з ливарною кіркою або при переривчастому різанні. Виходом із ситуації є формування наноструктурованих поверхневих шарів, що підвищують ударну в'язкість інструменту без зниження його твердості [2–3].

Це дослідження спрямоване на теоретичне обґрунтування умов наноструктурування кібориту шляхом дії імпульсного лазерного або іонізуючого випромінювання, що супроводжується локальним швидкісним нагріванням і охолодженням.

Матеріали і методи

Матеріалом дослідження є РІ - кіборит – композитний надтвердий матеріал, розроблений в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. Його фізико-механічні характеристики включають: твердість за Кнупом – 30 ГПа; теплопровідність – 100 Вт/(м·К); густина – 3,26 г/см³; границя міцності – 0,45 ГПа.

Моделювання теплового впливу виконано шляхом розв'язання спільної задачі теплопровідності та термопружності з урахуванням витрат енергії на фазові перетворення та можливе кристалізування. Розрахунки виконані для діапазонів: густина теплового потоку: 10⁸ – 10¹¹ Вт/м² та тривалість імпульсу: 10⁻⁷ – 10⁻⁴ с.

Аналіз проводився з урахуванням температурного критерію ($T > 500$ К) і динамічного критерію ($dT/dt > 10^7$ К/с), які є необхідними для утворення стабільних наноструктур при імпульсному енерговпливу.

Результати дослідження

1. Температурне поле та критичні умови:

Розрахунки показали, що при дії іонізуючого випромінювання з щільністю 10¹¹ Вт/м² вже за 10⁻⁷ с температура поверхні кібориту досягає 560 К, що є пороговим значенням для наноструктурування. При 10⁻⁶ с температура зростає до 1120 К, а при 10⁻⁵ с до 2900 К, що забезпечує умови не лише для зародження, а й для зростання наноструктур до субмікронного рівня.

2. Температурно-індуковані напруження:

Температурні напруження в матеріалі при вказаних режимах досягають 2,33·10⁹ Па, що підходить до межі активації пластичної деформації та структурної перебудови. Це сприяє формуванню локалізованих зон з наноструктурованою або субмікроструктурованою кристалічною будовою.

3. Глибина наноструктурування:

Залежно від тривалості імпульсу, наноструктури формуються на глибинах:

$t = 10^{-7}$ с: до 2,27·10⁻⁶ м,

$t = 10^{-6}$ с: до 3,59·10⁻⁵ м,

$t = 10^{-5}$ с: до $7,19 \cdot 10^{-5}$ м.

При щільності нижче 10^9 Вт/м² температурний критерій не виконується навіть у приповерхневому шарі, що виключає можливість наноструктурування.

4. Швидкість наростання температури:

Для утворення наноструктур критично важливим є швидкий нагрів — понад 10^7 К/с. Цей критерій виконується при $q \geq 10^{10}$ Вт/м², особливо у верхніх шарах матеріалу. Однак якщо температура не перевищує 500 К, утворення наноструктур не відбувається навіть при великій швидкості нагріву.

5. Оптимальні режими:

Визначено оптимальний діапазон параметрів:

$q = 10^{10} - 10^{11}$ Вт/м²,

$t = 10^{-7} - 10^{-5}$ с,

який забезпечує обидва критерії: температуру в межах 500–1500 К і швидкість нагріву $>10^7$ К/с, що є необхідною умовою формування наноструктурованого шару з заданими фізико-механічними властивостями.

Висновки

1. Кіборит як надтвердий матеріал може бути ефективно модифікований шляхом формування наноструктурованого шару під дією імпульсного теплового впливу.

2. Найбільш сприятливими умовами для цього є висока щільність теплового потоку ($10^{10} - 10^{11}$ Вт/м²) у поєднанні з надкороткими імпульсами ($10^{-6} - 10^{-7}$ с), які забезпечують необхідні температурні та динамічні характеристики.

3. Температурний і швидкісний критерії формування наноструктур повинні розглядатися спільно при проектуванні технологічних режимів енерговпливу.

4. Результати моделювання можуть бути використані для розробки лазерних або іонно-променевих технологій зміцнення ріжучого інструменту, що працює в екстремальних умовах.

Науковий керівник: к.т.н., доцент, Широкий Ю.В.

Список використаних джерел

1. Efficiency and Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class. [Text] / Kostyuk G., Popov V., Shyrokyi Y., Yevsieienkova H./ In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. (2021)

2. Kostyuk, G. Scientific bases of selection of sequence of layers in multilayer nano coatings on CT from a hard alloy as for continuous and in periodic cutting [Text] / G. Kostyuk, E. Kostyuk / New leading technologies in machine building: addition for proceedings XXVII International conference, 3 – 8 September. – Koblevo-Kharkov, 2017.- P. 24.

3. Kostyuk, G. I. Forecasting physico-mechanical characteristics on the size of grain coated or the basic material of detail [Text] / G. I. Kostyuk, Tymofyeev A.G. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 35-37.

4. Kostyuk, G. I. Efficiency and resource of cutting tools from solid alloys when purified steel 100Cr6 (3505) [Text] / Nechyporuk M. V., Kostyuk G. I. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 29-35

Кононенко С.М.,¹ м.н.с.

serhiikonono@gmail.com

Добротворський С.С.,^{1,2} д.т.н., професор

sergiy.dobrotvorsky@khpі.edu.ua

**МОДЕЛЮВАННЯ ТРИБОЛОГІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ПЕРІОДИЧНИХ
НАНОСТРУКТУР
З ПРЯМОКУТНОЮ ТА ЗГЛАДЖЕНОЮ МОРФОЛОГІЄЮ ПРОФІЛЮ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНОЇ ДИНАМІКИ**

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна²Познанський університет природничих наук, Польща

Застосування поверхонь з періодичними наноструктурами забезпечує перспективні можливості для тонкого налаштування трибологічних, оптичних та гідродинамічних властивостей функціональних поверхонь. Зокрема, структури з прямокутною або згладженою морфологією є перспективним для, підвищення зносостійкості та оптимізації показників гідродинамічного ковзання, зменшення мікрорухового тертя та стабілізації роботи вузлів машин. Такі структури можуть бути використані у високоточних, високонавантажених або енергоефективних механізмах, контактних зонах лопаток, насосів або турбомашин, у тому числі, для оптимізації розподілу течії робочого тіла завдяки мікро- і нанорельєфу. Широкі технічні можливості прогресивного машинобудування дають змогу виконувати формування структур різноманітної геометрії профілю, як симетричної, так і асиметричної з контролем висоти, ширини та періоду.

Представлено аналіз поверхневих періодичних структур з прямокутною морфологією, які отримані шляхом лазерного абляції, а також згладженої морфології, що утворюються в результаті додаткового термічного згладжування за допомогою керування фокальною площиною лазера, а також термічної мікрохвильової обробки. Застосовано метод нелінійного моделювання молекулярної динаміки, що дозволив обчислити трибологічні параметри, зокрема, коефіцієнти тертя та показники зносу сполучених поверхонь. Модель наведена у взаємодії сферичного наконечника з наноструктурованою поверхнею, що імітує контакт у класичному трибологічному випробуванні типу pin-on-disk. Застосована модель є етапом чисельного аналізу, метою якого є оцінка поведінки структур з різною морфологією профілю, що дає змогу попередньо відтворити умови реального тертя та зносу традиційно досліджуваних в експериментальних трибосистемах. У моделі виявлено відмінну поведінку MD-модельованих атомів у зоні контакту між асперами в залежності від профілю структури: найбільша кількість атомів після подолання сили зчеплення прилипають до сферичного наконечника у випадку прямокутного профілю наноструктури, що відповідає адгезійному зносу з матеріальним переміщенням, тоді як найбільша кількість атомів зміщуються в межах кристалічної решітки наноструктурованої поверхні у випадку згладженої структури, що відповідає пластичній деформації. У такий спосіб визначено, як зміна морфології нерівностей та режимів навантаження впливає на переважання тієї чи іншої поведінки сполучної поверхні. Аналіз співвідношення між наведеними взаємодіями дозволив глибше інтерпретувати інтенсивність зношування та характері механізми переносу матеріалу за різних умов.

Дослідження розроблено в межах НДР «Формування і трансформація періодичних нановуглецевмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР №0124U000481), що виконується на замовлення МОН України.

Савченко Н.В., к.ф.-м.н, доцент
n.savchenko@khai.edu
Шорінов О.В., к.т.н., доцент
o.shorinov@khai.edu
Білан Д.О., аспірант
d.bilan@student.khai.edu

УТВОРЕННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ СТРУКТУР В ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПОКРИТТЯХ ПІД ДІЄЮ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Зношення поверхонь деталей є однією з головних причин зниження ресурсу машин та обладнання, особливо тих, що експлуатуються у складних умовах. У зв'язку з цим, виникає необхідність у розробці нових високоефективних технологій формування покриттів з підвищеною зносостійкістю. Особливий інтерес становлять інтерметалідні покриття, отримані методом холодного газодинамічного напилювання (ХГН) з наступною термічною (у тому числі лазерною) обробкою, що дозволяє формувати структури з унікальними властивостями без впливу високих температур на підкладку [1, 2].

Розвиток інженерії поверхні дозволив запропонувати різноманітні методи модифікації поверхневих шарів. Однак традиційні методи, такі як плазмове, газотермічне напилювання або лазерне наплавлення, мають обмеження у випадку з титановими сплавами – через високий тепловий вплив, ймовірність перегріву основи та обмежену адгезію. Метод ХГН вирізняється низькою температурою процесу, що зберігає вихідний хімічний і фазовий стан порошку та основи, а також дозволяє отримати покриття з властивостями, близькими до порошкового матеріалу [3, 4].

Недостатньо вивченими у межах проблематики створення зносостійких інтерметалідних покриттів залишаються такі аспекти: процеси формування фаз у системах NiTi та TiAl [5, 6]; вплив режимів термічного (зокрема лазерного) оброблення на фазовий склад покриттів і міцність їх зчеплення з підкладкою; характер мікроструктурних змін залежно від товщини нанесеного шару та параметрів лазерного сканування [6]; а також можливість встановлення кореляцій між технологічними параметрами холодного газодинамічного напилювання та основними експлуатаційними характеристиками отриманого покриття [1, 5].

Метою дослідження є підвищення зносостійкості поверхонь з титанових сплавів шляхом створення комплексної технології отримання інтерметалідних покриттів систем NiTi і TiAl, сформованих методом холодного газодинамічного напилювання з подальшою термічною (лазерною) обробкою. У межах дослідження розроблено концепцію формування таких покриттів, теоретично та експериментально обґрунтовано режими ХГН для забезпечення необхідної товщини і якості покриттів, вивчено вплив параметрів ХГН на їх структуру, товщину та експлуатаційні характеристики, а також вплив режимів термічного оброблення на фазові перетворення і зчеплення з основою. Встановлено закономірності синтезу інтерметалідів залежно від методу термообробки, досліджено зносостійкість покриттів за різних умов експлуатації та сформульовано рекомендації щодо впровадження технології у виробничих і ремонтних процесах.

Комплекс досліджень включає в себе використання методу планування багатофакторного експерименту та статистичної обробки результатів для аналізу впливу параметрів ХГН на характеристики покриттів. Це дозволяє побудувати математичні моделі залежності цільової функції від вхідних параметрів, визначити оптимальні режими напилювання для обраних порошкових матеріалів. Отримані результати дозволяють запропонувати нові методики прогнозування властивостей покриттів, а також удосконалити

систему вибору технологічних режимів, що сприяє скороченню часу на розробку технологій нанесення інтерметалідних покриттів у виробництві й ремонті.

Запропонована технологія формування інтерметалідних покриттів методом ХГН з подальшою термообробкою демонструє високу ефективність щодо зносостійкості та міцності зчеплення з основою. Дослідження показали, що керування режимами напилювання та обробки дає змогу цілеспрямовано формувати структуру покриттів, адаптовану до складних експлуатаційних умов. Визначені залежності між технологічними параметрами та властивостями покриттів можуть бути використані для впровадження у практику авіаційних підприємств.

З огляду на дефіцит і високу вартість комплектуючих, зокрема імпортного виробництва, а також ризики, пов'язані з простоюванням техніки, запропонована технологія створення зносостійких інтерметалідних покриттів відкриває нові можливості для їх ефективного відновлення. Реалізація дослідження дозволяє продовжити ресурс деталей, зменшити витрати на ремонт і модернізацію, підвищити ступінь використання ресурсів і зменшити залежність від зовнішніх поставачань. Комплексна технологія ХГН у поєднанні з термічною (лазерною) обробкою має високий потенціал для широкого впровадження як у виробництві, так і при відновлювальному ремонті, включаючи ті випадки, коли деталі традиційно вважаються непридатними до повторного використання.

Список використаних джерел

1. Assadi H., Kreye H., Gärtner F., Klassen T. Cold spraying – A materials perspective // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 116. – P. 382–407. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.06.34.
2. Champagne V. K. *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. – Oxford: Woodhead Publishing, 2007. – 328 p
3. Li C.-J., Li W.-Y. Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 167, № 2–3. – P. 278–283. – DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00919-2.
4. Leshchinsky E., Sobiesiak A., Maev R. Intermetallic Al-, Fe-, Co- and Ni-Based Thermal Barrier Coatings Prepared by Cold Spray for Applications on Low Heat Rejection Diesel Engines // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 456–470. – DOI: 10.1007/s11666-017-0681-z.
5. Nikbakht R., Assadi H., Jodoin B. Intermetallic Phase Evolution of Cold-Sprayed Ni-Ti Composite Coatings: Influence of As-Sprayed Chemical Composition // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. – Vol. 30. – P. 119–130. – DOI: 10.1007/s11666-020-01112-8.
6. Rutkowska-Gorczyca M., Wiśniewski M., Dziubek M., Winnicki M. Impact of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of Ti–Al Composite Coatings with Formation of a TiAl_3 Intermetallic Phase // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, № 12. – Art. № 1497. – DOI: 10.3390/coatings14121497.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМІРУ ЗЕРНА У ТВЕРДОМУ СПЛАВІ T15K6 ПІД ВПЛИВОМ ІОННОГО ОПРОМІНЕННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В тезах розглядається прогнозування розміру зерна в твердому сплаві T15K6 під впливом іонного опромінення з урахуванням енергії кристалізації. Проведено теоретичні розрахунки розміру зерна для різних іонів (B^+ , C^+ , N^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ , Fe^+) з різними зарядами ($z = 1, 2, 3$) та енергіями (200 еВ – 20 кеВ). Дослідження показує залежність розміру зерна від енергії іона та додаткової енергії кристалізації, що впливає на фізико-механічні характеристики поверхневого шару. Результати мають практичне значення для оптимізації ріжучих інструментів із наноструктурними покриттями.

Тверді сплави типу T15K6 широко застосовуються в обробці високоміцних і загартованих сталей, зокрема при переривчастому різанні, де потрібні висока твердість поверхні та низький модуль пружності. Традиційні покриття та зміцнені шари не забезпечують необхідних характеристик. Нанеструктури з малим розміром зерна, завдяки високій твердості та зносостійкості, а також малому модулю пружності, здатні витримувати значні ударні навантаження без втрати міцності. Це робить створення наноструктурних шарів на сплаві T15K6 перспективним для підвищення його експлуатаційних властивостей [1].

Дослідження проводилися з урахуванням економічної доцільності, замінюючи дорогі експерименти теоретичними розрахунками, що базуються на енергії кристалізації для утворення нанокластерів. Метою роботи є визначення оптимальних параметрів іонного опромінення (сорт іонів, заряд, енергія) для прогнозування розміру зерна та оцінки фізико-механічних характеристик (мікротвердість, модуль пружності, межа текучості, межа міцності).

Проводилися розрахунки розмірів зерна залежно від енергії іона з урахуванням енергії, що витрачається на кристалізацію, для різних іонів B^+ , C^+ , N^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ , Fe^+ із різними зарядами ($z = 1, z = 2, z = 3$). Аналіз показує, що для іона B^+ при малих енергіях реалізуються розміри зерна менше 10 нм, при збільшенні енергії до 2000 еВ вони зростають, досягаючи або навіть перевищуючи 10 нм. При підвищенні енергії до 20 кеВ розмір зерна лежить у діапазоні від 40 до 95 нм, при цьому більші розміри відповідають більшому заряду іона. Також варто зазначити, що при відносно низьких початкових енергіях додаткова енергія на кристалізацію становить 10–15 еВ, а для 20 кеВ вона перевищує 1 кеВ.

При переході до іона C^+ характер кривих зберігся, але значення розміру зерна стали дещо меншими; значення додаткової енергії знизилися, але незначно (рис. 1, а).

При переході до іона азоту N^+ , незважаючи на те, що розміри зерна суттєво не змінилися, додаткова енергія значно знизилася. Це, ймовірно, пов'язано з більшою масою іона азоту. Далі проводилося дослідження впливу іонів металів Al^+ , V^+ , Cr^+ на твердий сплав T15K6. Так, у випадку дії іона алюмінію мінімальний розмір нанокластера зменшується до значень менше 1 нм, що, як показано в огляді [2], може навіть погіршити фізико-механічні характеристики (ФМХ) поверхневого шару. Хоча зниження розміру зерна для енергії іонів 2 кеВ і 20 кеВ дозволить покращити їхні ФМХ. У такому випадку додаткова енергія на кристалізацію зменшується і становить 3–8% від початкової енергії. При дії іонів V^+ розмір зерна продовжує зменшуватися. Так, при енергіях близьких до 200 еВ він стає для однозарядного іона практично меншим за 1 нм, а для тризарядного становить 4 нм, що також є критичним. Для іонів з енергією близько 2 кеВ він перебуває в діапазоні від 5 до 8 нм, що якраз лежить у зоні максимальних ФМХ. При енергіях близько 20 кеВ розмір зерна становить від 11 до 25 нм, що також є прийнятним для використання в РІ. Для іонів Cr^+ розмір зерна ще

більше зменшився, і поблизу енергії 200 еВ він не відповідає необхідним значенням для підвищення ФМХ, тоді як при енергіях 2 і 20 кеВ ці значення близькі до 10 нм, що дозволяє припустити високі ФМХ поверхневого шару. У цьому випадку додаткові енергії на кристалізацію незначні.

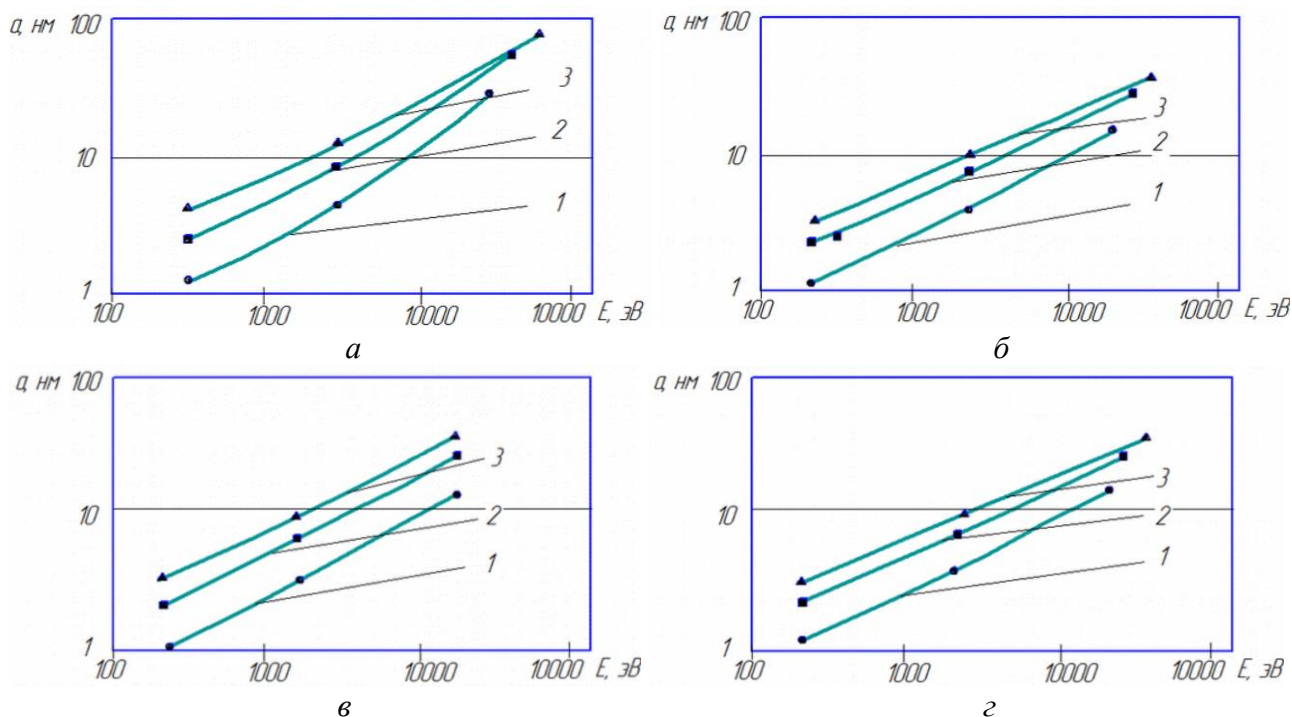


Рис. 1. Залежність розміру зерна від енергії іонів вуглецю (а), кисню (б), ітрію (в) і гафнію (г) від їхньої енергії при різних зарядах ($z = 1$, $z = 2$, $z = 3$)

Для іона O^+ реалізуються більш сприятливі умови для утворення наноструктур, і розмір зерна становить від 2 нм до 5 нм (200 еВ). При енергіях 2 і 20 кеВ розмір зерна лежить у межах 7–30 нм, що є прийнятним для підвищення ФМХ поверхневого шару. У цьому випадку додаткова енергія на кристалізацію становить від 2 до 9% від початкової енергії (див. рис. 1, б).

Перехід до іонів Ni^+ і Fe^+ призводить до того, що мінімальний розмір зерна становить близько 1 нм (200 еВ), тоді як при 2 кеВ розмір зерна становить 5–9 нм, а при 20 кеВ — від 12 нм до 45 нм. Додаткова енергія на кристалізацію становить від 1% до 7%.

Для іонів кобальту, ітрію (рис. 1, в) і цирконію залежності розміру зерна від енергії показали, що значення розміру зерна при переході від кобальту до цирконію дещо зменшуються, а величини додаткової енергії, що витрачається на кристалізацію, знижуються порівняно з іонами заліза, не кажучи вже про іони кисню, що дозволяє для цих іонів цей ефект не враховувати. Аналіз аналогічних залежностей для іонів молібдену, гафнію і танталу (див. рис. 1, г) показав, що значення розміру зерна для малих енергій (200 еВ) лежать у межах від 1 до 4 нм, для більших енергій ($2 \cdot 10^3$ еВ) — від 4 до 10 нм, а при високих енергіях (20 кеВ) — у межах 11–30 нм. Величина додаткової енергії не перевищує 3–5% від початкової енергії.

Аналогічні дослідження, проведені для іонів вольфраму і платини, показують, що діапазони розмірів зерна для кожної групи енергій приблизно однакові, а додаткова енергія на кристалізацію ще зменшилася.

Дослідження залежності розміру зерна від енергії іонів з урахуванням додаткової енергії кристалізації для легких іонів (B^+ , C^+ , N^+ , Al^+ , O^+) із зарядами ($z = 1, 2, 3$) реалізують найвищі значення розміру зерна, які навіть наближаються до 100 нм (20 кеВ, $z = 3$). У цьому випадку додаткова енергія, необхідна для утворення нанокластера, максимальна, і для малих енергій становить десятки еВ, для високих енергій наближається до 1 кеВ. Це свідчить про те, що в такому випадку необхідно обов'язково враховувати енергію на кристалізацію. Для інших

іонів (V^+ , Cr^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ , Fe^+) розмір зерна суттєво зменшується до одиниць нанометрів при малих енергіях (200 eV) і до 10–30 нм для високих енергій (20 keV). У цьому випадку додаткова енергія, необхідна для утворення зерна, значно знижується і не перевищує 5% від початкової енергії.

Теоретичні розрахунки демонструють, що розмір зерна в T15K6 можна прогнозувати, враховуючи енергію кристалізації та параметри іонного опромінення. Оптимальні розміри (5–30 нм) досягаються для V^+ , Cr^+ , O^+ при 2–20 keV, що забезпечує високу працездатність ріжучих інструментів. Подальші дослідження потрібні для експериментальної верифікації.

Список використаних джерел

1. Костюк Г.І. Нанотехнології: вибір технологічних параметрів і установок, продуктивність обробки, фізико-механічні характеристики наноструктур : монографія / Г.І. Костюк. – К. : Вид. центр Міжнар. академії наук і інновац. технологій, 2014. – 472 с.
2. Костюк Г.І. Нанотехнології: теорія, експеримент, техніка, перспективи : монографія / Г.І. Костюк. – К. : Вид. центр Міжнар. академії наук і інновац. технологій, 2012. – 648 с.
3. Костюк Г.І. Ефективні покриття і модифіковані зміцнені шари на ріжучих інструментах : моногр.-довідник / Г.І. Костюк. – К. : Вид-во Міжнародної академії наук і інноваційних технологій, 2012. – 728 с.
4. Krasheninnikov A.V., Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107, № 7. – P. 071301. – DOI: 10.1063/1.3318261.

ПІДВИШЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Розроблення нових технічних рішень, які дозволяють забезпечити зниження витрат при здійсненні процесів модифікування поверхневих шарів виробів, є нині особливо актуальним. Якщо на ранніх етапах розвитку вакуумно-дугових технологій (ВДТ) на першому плані був економічний ефект, який одержують при використанні виробів зі зміцненими поверхневими шарами, а витрати на отримання такого результату відходили на другий план, то в сучасних умовах істотним є і зниження витратних механізмів при реалізації методів ВДТ. [1].

При аналізі частки енергії того чи іншого вузла в загальній споживаній енергії слід враховувати час його роботи протягом циклу проведення оброблення. Розподіл енергоспоживання при реалізації типового технологічного процесу основними вузлами установки «Булат-6», що є типовим представником установок цього класу, показано на рис. 1.

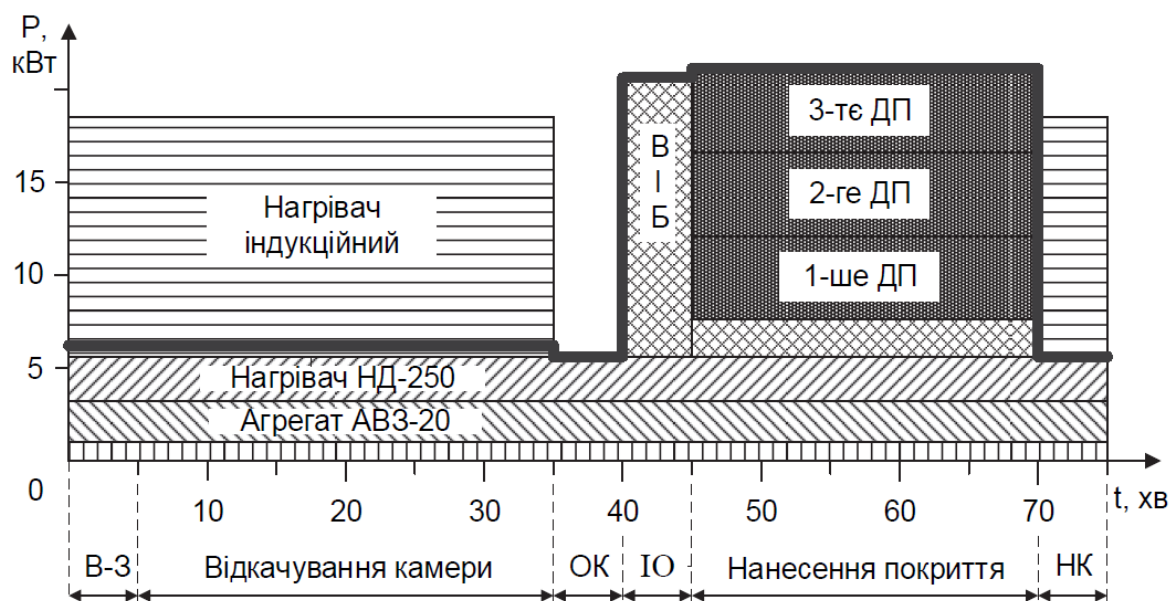


Рис. 1. Споживання енергії вузлами установки «Булат-6» при реалізації типового технологічного процесу: ВІБ – випрямляч іонного бомбардування; ДП – джерело плазми; В-З – вивантаження (завантаження) виробів з (в) камери (у); ОК – охолодження камери; ІО – іонне очищення; НК – нагрівання камери

З аналізу рис. 1 очевидна неефективність застосованого в більшості іонно-плазмових установках рішення щодо прогрівання вакуумної камери, коли є окремий потужний нагрівач води, а енергія, що відводиться від окремих вузлів установок йде на нагрівання води і потім ця нагріта вода, яка не використовується і відводиться в систему охолодження (в гіршому випадку взагалі скидається в каналізаційну систему), потребувала розроблення нового рішення, спрямованого на усунення цього недоліку. З цією метою як потенційні джерела нагрівання води були розглянуті різні вузли установки. При цьому основним критерієм вибору була умова збереження працездатності вузла при його використанні в новій якості.

Було з'ясовано, що поставленому критерію задовольняють вузли охолодження катодів і анодів джерел плазми, в яких без погіршення режиму роботи після деяких доробок можна

здійснювати нагрівання води до рівня близько 60...80 °С. Потужність такого нагрівача визначається потужністю, що виділяється на катоді й аноді вакуумно-дугового розряду в джерелі плазми. Відомо, що в дуговому й іскровому розрядах співвідношення енергії P_a/P_k , що виділяється на аноді P_a і катоді P_k , може бути як більше, так і менше одиниці, і визначається безліччю факторів (вид і тиск газу, струм розряду, його тривалість, довжина та ін.). У першому наближенні можна вважати $P_a = P_k$, а втрати на випромінювання такими, що дорівнюють близько 20 % від загальної потужності розряду. Орієнтовний розрахунок, виконаний у припущенні величини сумарної потужності, що виділяється на катоді і аноді вакуумно-дугового джерела плазми, порядку 0,8 від номінальної потужності розряду (3 кВт), показує, що до температури 80 °С за одну годину роботи такий нагрівач (джерело плазми) зможе нагріти близько 35 літрів води.

Систему прогрівання вакуумної камери, розроблену на основі розглянутого принципу, показано на рис. 2 [2].

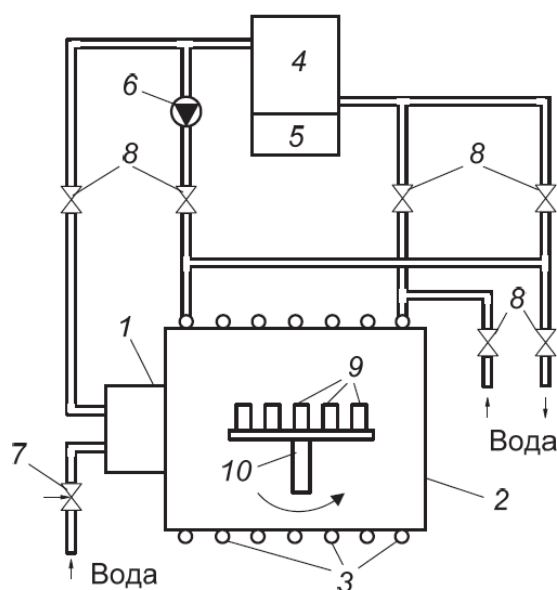


Рис. 2. Схема прогрівання вакуумної камери з використанням енергії, що відводиться від джерела плазми: 1 – джерело плазми; 2 – вакуумна камера; 3 – мідні трубки; 4 – термоізолювальна акумулювальна ємність; 5 – резервний нагрівач; 6 – циркуляційний насос; 7 – регулювальний вентиль; 8 – клапана; 9 – оброблювані вироби; 10 – підкладкотримач

Рис. 2. Блок-схема системи прогрівання вакуумної камери

Технічні рішення, покладені в основу роботи системи прогрівання вакуумної камери: основне нагрівання енергією, що відводиться від джерела плазми; додаткове підігрівання нагрівачем невеликої потужності (1 кВт); використання циркуляції теплоносія, дозволяють економити при її роботі до 80 електроенергії порівняно зі штатною системою прогрівання камери установки «Булат-6». Зменшення витрат електроенергії при застосуванні розробленої системи прогрівання вакуумної камери відображає жирна лінія на рис. 1.

Регламентована витрата води установкою «Булат-6» згідно паспортних даних, не більше 1200 л/год. З цієї кількості 100 л/год споживає система охолодження дифузійного насоса НВДМ-250, а та, що залишилася, витрачається на охолодження джерел плазми і систему нагрівання-охолодження вакуумної камери. За умови приблизно однакового споживання води цими вузлами, кожен споживач води установки витрачає близько 275 л/год.

Застосування джерел плазми як нагрівачі води приводить до зниження її витрати через джерело до 35 л/год (при температурі теплоносія на виході 80 °С). При використанні схеми прогрівання вакуумної камери з циркуляцією теплоносія, наведеної на рис. 2, система нагрівання-охолодження вакуумної камери в режимі прогрівання воду не споживає. Її споживання йде тільки в режимі охолодження камери.

У режимі охолодження камери слід розрізняти два етапи. Перший, коли нагріта камера охолоджується до робочої температури (рис. 1), і другий, коли підтримується робоча температура камери під час нанесення покриттів. Якщо на першому етапі для скорочення часу

технологічного циклу витрата води має бути на номінальному рівні, то на другому робочу температуру можна підтримувати при меншій течії охолоджувальної води (на рівні близько 0,5 від номінальної витрати).

На окрему увагу заслуговує питання виходу на робочий режим енергоспоживаючих вузлів іонно-плазмових установок. Як звичайно, цей процес супроводжується охолодженням ще непрогрітого вузла, що призводить до невиправданих затрат енергії і витрати води, непродуктивних втрат часу. Для прикладу, час прогрівання катода джерела плазми установки «Булат-6» до температури 80 °С при параметрах: катод – титан, діаметр катода – 60 мм, довжина – 35 мм, струм дуги – 100 А становить приблизно 21 с за відсутності витрати охолоджувальної рідини. За наявності витрати охолоджувальної рідини цей час збільшується і досягає декількох хвилин.

Аналогічна ситуація має місце і при виході на робочий режим дифузійного насоса, коли його прогрівання здійснюється при номінальній витраті води. Ця обставина істотно збільшує час прогрівання дифузійного насоса (тобто збільшує споживання електроенергії) і витрати води. Сучасні дифузійні насоси забезпечуються термодатчиками від перегрівання, що спрацьовують при нагріванні корпусу насоса до температури ≈ 50 °С. Використання сигналу такого датчика для включення подачі охолоджувальної води забезпечує скорочення часу виходу насоса на робочий режим і одночасно знижує витрату електроенергії і води.

Наведені приклади показують доцільність для скорочення загального часу виходу на робочі режими і зменшення витрати енергії і води, у період виходу енергоспоживаючих вузлів установок на робочі режими використовувати підхід, який полягає в тому, що в цей період здійснювати змінну витрату води – мінімальну до виходу вузла на робочий режим і номінальну після виходу.

Здавалося б, невелика економія часу в 21 с, коли в період виходу на робочий режим катода витрата охолоджувальної рідини відсутня, не позначиться істотно на загальній картині витрати води. Однак це дозволяє при реалізації процесу напилення тривалістю в одну годину при двозмінній роботі економити в рік близько 8000 л охолоджувальної рідини для одного джерела плазми установки «Булат-6».

Відповідно, економія буде вище у кілька разів при одночасній роботі декількох джерел плазми і при меншому часі нанесення покриттів (більшій кількості циклів напилення в зміну). Подальше постійне зменшення витрати води під час роботи джерела плазми пов'язане з ерозією катода і відповідним змінням довжини катода.

Таке ж технічне рішення щодо охолодження насоса НВДМ-250 дозволяє економити до 2000 л охолоджувальної рідини в рік. Крім зниження витрати води в обох розглянутих випадках відбувається і економія електроенергії і часу.

При збереженні всіх функціональних можливостей стандартної установки модернізована установка дозволяє в 2 – 3 рази зменшити витрату охолоджувальної води при одночасному зниженні споживання енергії і допоміжного часу.

Список використаних джерел

1. Сисоєв, Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : монографія / Ю. О. Сисоєв. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.

2. Пат. України № 110362; МПК С23С 14/32 (2006.01). Застосування джерела плазми як пристрою для нагріву вакуумної камери іонно-плазмової установки / Ю. О. Сисоєв, Г. І. Костюк ; Заявник та патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т». – № а2013 10008 ; заявл. 12.08.2013. Опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ОСАДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ PVD СИСТЕМ З АРКОВОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Системний аналіз сучасних технологій фізичного осадження з парової фази (PVD) є метою удосконалення методів нанесення функціональних зносостійких покриттів для інженерних виробів. Серед недоліків традиційних підходів, таких як термічне випаровування, катодне та магнетронне розпилення, виникають обмеження їх застосування в умовах високонавантаженого виробництва. До основних проблем базових технологій віднесено нерівномірність випаровування мішені, низьку продуктивність процесу, перегрів джерел матеріалу, нестабільну адгезію покриттів до підкладки та ймовірність виникнення дугових розрядів у плазмі, що негативно впливають на якість покриттів.

У контексті подолання вказаних обмежень пропонуються сучасні модифіковані підходи: імпульсне магнетронне розпилення високої потужності (HIPIMS), незбалансоване магнетронне розпилення, іонну імплантацію з плазмовим осадженням (PIPD), а також методи з високочастотним живленням. Аналіз фізичних процесів і структурних ознак кожного методу дає шляхи для комбінування методів з високою ефективністю нанесення покриття. На основі отриманих результатів [1] сформована аналітична класифікаційна схема методів PVD, що враховує рівень іонізації плазми, джерело енергії, особливості обмеження електронів у магнітному полі, температурні режими та можливість комбінування підходів.

Наступний крок – дослідження розряду з арочною конфігурацією магнітного поля в якому виникає низка технічних проблем, які обмежують ефективність та якість формованих покриттів. Аркова конфігурація магнітного поля у PVD-системах, попри здатність забезпечити високу щільність плазми, супроводжується рядом критичних проблем — таких як нестабільність розряду, перегрів мішені та утворення макрочастинок. Їхнє подолання вимагає комплексного підходу, що поєднує експериментальні методи діагностики плазми з чисельним моделюванням та інженерними рішеннями на рівні апаратного забезпечення. Такий підхід створює підґрунтя для оптимізації дугових PVD-процесів і розвитку високотехнологічних систем осадження з покращеними характеристиками покриттів, зокрема для умов Індустрії 4.0.

Список використаних джерел

1. Степаненко Д. Р. Комбіновані технології PVD-методів осадження покриттів: від класифікації до інноваційних рішень / Д.Р. Степаненко, Є. О. Баранова, О. О. Баранов // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2025. – №104. – 49 – 81 с. doi: 10.32620/oikit.2025.104.05
2. Perambadur J. The Arc Rotational Characteristics Inside a Plasma Torch with an External Magnetic Field / J. Perambadur, P. Shukla, A. Y. Klimenko, K. Ramachandran, V. Rudolph// Journal of Thermal Spray Technology. – vol. 32. – 2023. – 1433 – 1446 pp. doi.org/10.1007/s11666-023-01546-w

КОМБІНОВАНЕ ЗМІЦНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА РІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГОЄМНИХ ПОТОКІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Поелементний аналіз плазмово-іонної, іонно-променевої та світло-променевої технологій виявив їхні ключові обмеження: плазмово-іонна обробка не дозволяє наносити товсті покриття (>100 мкм) через утворення тріщин, іонно-світлова — хоча й забезпечує глибоке зміцнення, є недостатньо ефективною у приповерхневій зоні, а жодна з них не сприяє покращенню втомної міцності. Водночас, поєднання окремих методів у рамках комбінованих технологій дозволяє компенсувати ці недоліки та досягати суттєвого покращення експлуатаційних властивостей [1].

Навіть обмежений аналіз застосування іонних, електронних, світлових і плазмових потоків свідчить про значний потенціал цих технологій [22]. Водночас для досягнення високої якості, продуктивності та формування нових властивостей оброблюваних поверхонь виникає необхідність у впровадженні комбінованих технологічних підходів.

Серед найбільш перспективних варто виділити іонно-іонні комбіновані технології, зокрема:

- напилення з іонним легуванням, яке дозволяє формувати поверхні з заданим розподілом властивостей на глибину до 10^{-4} м;

- напилення з модифікацією, що забезпечує формування інтегрованого модифікованого шару між покриттям і основним матеріалом.

Іонно-електронні технології:

- напилення покриттів на керамічні матеріали з подальшим електронним впливом для покращення їх якості;

- іонне напилення з модифікацією електронним пучком, що забезпечує покращення характеристик поверхневого шару.

Світло-іонні технології:

- іонне прошивання отворів із подальшим лазерним відпалом для зняття залишкових напружень;

- іонна модифікація з лазерним відпалом у зонах концентрації напруг для зменшення їх рівня;

- іонне фрезерування з лазерною обробкою, що знижує напруженість у приповерхневому шарі.

Світло-електронні технології:

- прошивання отворів з лазерним відпалом, що дозволяє мінімізувати залишкові напруги у зоні обробки;

- модифікація з лазерним впливом у зонах концентрації напруги без погіршення характеристик поверхонь.

Плазмово-іонні технології:

- плазмове напилення з іонним легуванням для підвищення якості та товщини покриття;
- напилення з іонною модифікацією, що забезпечує зміцнення приповерхневого шару до глибини 10^{-4} м.

Плазмово-світлові технології:

- напилення з лазерною модифікацією для покращення властивостей і збільшення товщини покриття.

Анодно-світлові технології:

- анодно-світлове різання, яке дозволяє підвищити точність та якість обробленої поверхні за рахунок прив'язки анодної плями до світлової зони;
- анодно-світлове зміцнення із керованим переміщенням катодної плями за допомогою світлового потоку, що забезпечує ефективну обробку або розрізку деталей.

Катодно-світлові технології:

катодно-світлове зміцнення, яке реалізує послідовне кероване зміцнення шляхом переміщення катодної плями у зону дії світлового потоку.

Прогнозування якісних характеристик деталей, оброблених комбінованими технологіями, здійснюється у двох основних напрямках:

При послідовній дії технологічних впливів (рознесених у часі або просторі), характеристики поверхневого шару визначаються шляхом суперпозиції властивостей окремих обробок із урахуванням коефіцієнта їх взаємного впливу.

При одночасному впливі в одній зоні якісні показники визначаються на основі еквівалентного впливу домінуючої (базової) технології [1].

Як приклад реалізації першого підходу розглянуто нанесення плазмово-іонного покриття у поєднанні з лазерним зміцненням [1]. У цьому випадку формування заданого профілю мікротвердості здійснюється за рахунок зміцнюючого покриття у приповерхневій зоні (нітридні чи карбідні фази) та лазерного впливу на глибших шарах матеріалу.

Прикладом другого підходу є електронно-іонна модифікація поверхневого шару [2], для якої прогнозування якості здійснюється на основі еквівалентних теплових параметрів, приймаючи за базову, наприклад, іонну технологію.

У ході досліджень [1,2] отримано апроксимаційні залежності якісних характеристик від технологічних параметрів, що дає змогу здійснювати прогнозування для комбінованих методів обробки, зокрема плазмово-іонної, іонної імплантації, іонного легування, а також електронно- та світло-променевих технологій.

Висновок:

Аналіз сучасних методів комбінованої обробки поверхонь свідчить про значний потенціал технологій, що поєднують іонні, електронні, світлові та плазмові потоки. Незважаючи на обмеження кожного з методів у чистому вигляді, їхнє раціональне комбінування дозволяє ефективно компенсувати недоліки та забезпечити покращення таких важливих характеристик, як мікротвердість, зносостійкість, втомна міцність і якість поверхневого шару.

Запропоновані підходи до прогнозування властивостей оброблених матеріалів — як у випадку послідовної дії (суперпозиції ефектів), так і при одночасному впливі (еквівалентному моделюванні) — дозволяють цілеспрямовано керувати процесом формування заданих властивостей. Апроксимаційні моделі, побудовані на основі експериментальних і теоретичних даних, забезпечують основу для проєктування ефективних комбінованих технологій з урахуванням конкретних вимог до оброблюваних деталей.

З урахуванням високої ефективності таких підходів, перспективним напрямом є створення модульних технологічних установок, які дозволяють інтегрувати кілька типів енергетичних впливів у рамках єдиного виробничого циклу.

Список використаних джерел

1. Kostyuk, G. I. Forecasting physico-mechanical characteristics on the size of grain coated or the basic material of detail [Text] / G. I. Kostyuk, Tymofyev A.G. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 35-37.
2. Kostyuk, G. I. Efficiency and resource of cutting tools from solid alloys when purified steel 100Cr6 (3505) [Text] / Nechyporuk M. V., Kostyuk G. I. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 29-35

Широкий Ю.В., к.т.н., доцент
i.shyrokyi@khai.edu
Безпалов Д.І., аспірант,
bezpalov@khai.edu
Кот Н.І., зав. лабораторії
kotnatty@gmail.com

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДАХ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕЙ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Як було показано у деяких роботах, комбіновані технології забезпечують створення поверхневих шарів із необхідними характеристиками [1-3]. Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару при плазово-іонній обробці (ПІО), іонній імплантації (ІІ), лазерній обробці (ЛО) та ряді комбінованих процесів: плазово-іонній та лазерній обробці (ПІО+ЛО), іонній імплантації та лазерній обробці (ІІ+ЛО). З. Шляхом зміни товщини покриття, використання багатшарових покриттів, зміни енергії та сорту іонів при імплантації, щільності енергії та часу дії при лазерній обробці можна отримати необхідні види розподілу мікротвердості в поверхневих шарах завтовшки до 1 мм. Це дозволяє забезпечити необхідну зносостійкість і межу втомної витривалості за рахунок створення шарів з залишковими напругами стиснення, а також корозійну стійкість та інші характеристики деталі. Використання лазерної обробки та іонного легування дозволяє проводити вибірксову обробку окремих зон деталі. У роботах [2, 3] розглядаються перспективи впровадження комбінованих технологій, які дозволяють підвищити стійкість різального інструменту у 1,7–3,7 рази, зносостійкість – до 3,5 рази, корозійну стійкість – до 5 разів, а втомну міцність – у 1,15–4,5 рази. Також у [4, 5] запропоновано концепції конструювання установок для реалізації комбінованого зміцнення та нанесення покриттів.

Аналіз теоретичних досліджень, проведених науковою школою професора Г.І. Костюка, свідчить, що настільки значне покращення властивостей у разі застосування комбінованих технологій не можна пояснити лише ефектом суперпозиції характеристик, отриманих за допомогою окремих методів. Подібне зростання показників пов'язане з глибокими структурними змінами в зоні зміцнення, зумовленими дією комплексного технологічного впливу. Порівняння зносостійкості, досягнутої за допомогою окремих технологій, навіть при їхній суперпозиції, не дає результатів, які можна було б зіставити з ефективністю комбінованих процесів – отримані значення суттєво нижчі [1, 2]. У той же час, зростання корозійної стійкості може бути частково пояснене ефектом накладання властивостей, характерних для кожної з індивідуальних технологій [1, 3]. Аналіз робіт вказаної наукової школи свідчить, що підвищити втомну міцність у рамках комбінованої технології можливо переважно за рахунок посилення енергетичної взаємодії між зернами наноструктурованого шару. Такий підхід перешкоджає формуванню зародків втомних тріщин, на відміну від традиційних методів зміцнення, які, навпаки, можуть сприяти їх виникненню. Результати дослідження впливу комбінованого зміцнення на підвищення втомної стійкості, згідно з даними [1-3], наведено в табл. 1, де представлено аналіз застосування окремих комбінованих технологій:

– плазово-іонна (ПІО) та іонно-променева (ІЛО) обробки. Як видно з аналізу, застосування комбінованої обробки (ПІО+ІЛО) дозволяє підвищити зносостійкість у межах від 0,5 до 6 разів. Найменші прирости характерні для обробки титанових сплавів покриттями з титану та іонно-легованими твердими сплавами. Водночас використання покриття на основі $0,2\text{HfN} + 0,8\text{ZrN}$ у поєднанні з іонним легуванням гафнієм і цирконієм забезпечує приріст стійкості до 36 разів. Слід зазначити, що таке зростання стійкості не може бути пояснене простою сумою ефектів плазово-іонного покриття (яке дає приріст у 2,5-3 рази) та іонного легування (з приростом у 2,8-3,2 рази), адже їх суперпозиція дає лише 5,1-6,2 рази. Це свідчить

про наявність якісних змін у поверхневому шарі матеріалу. Раніше ми припускали, що подібний ефект може бути зумовлений утворенням твердих розчинів в результаті комплексного легування. Однак, спроби підтвердження цієї гіпотези не виявили суттєвого покращення властивостей: мікротвердість поверхні залишалась на рівні 42 ГПа. Це, в свою чергу, може опосередковано вказувати на формування наноструктурованих шарів.

Проведений огляд показує, що при комбінованому зміцненні відбуваються зміни в структурі оброблювального матеріалу, що призводять до підвищення стійкості ріжучого інструменту до 6,5 разів, зносостійкості до 6 разів, стійкості до корозії до 3 разів і втомної міцності до 1,5 рази. Всі ці унікальні властивості не можуть бути пояснені суперпозицією підвищення властивостей за рахунок індивідуальних технологій, а міцність втоми зазвичай після зміцнення знижується. Очевидно, комбіновано зміцнений матеріал за своїми характеристиками відповідає наноматеріалу, що має високу мікротвердість, високу ударну в'язкість, високе значення коефіцієнта Пуассона, що забезпечують високу працездатність зміцненого матеріалу РІ. Нестабільні характеристики комбіновано зміцненого матеріалу можна пояснити недостатньо повним заповненням об'єму, що зміцнюється полями температур і температурних напруг, що призводить до фрагментарного утворення наноструктур. Натомість це підтверджує можливість отримання наноструктур при комбінованому зміцненні. Аналіз проведених досліджень свідчить, що комбіноване зміцнення викликає структурні зміни в оброблюваному матеріалі, що, у свою чергу, забезпечує підвищення стійкості ріжучого інструменту до 6,5 разів, зносостійкості до 6 разів, корозійної стійкості до 3 разів, а втомної міцності до 1,5 рази. Зазначені покращення експлуатаційних властивостей не можуть бути пояснені простою суперпозицією ефектів, що виникають при застосуванні окремих технологій зміцнення. Більше того, в умовах традиційного зміцнення втомна міцність зазвичай знижується. Очевидно, що матеріал, оброблений комбінованими методами, за характеристиками відповідає наноматеріалу, для якого притаманні висока мікротвердість, значна ударна в'язкість і підвищений коефіцієнт Пуассона, що в сукупності забезпечують його високу працездатність у режимах різання. Водночас спостережувана нестабільність властивостей такого зміцненого матеріалу може бути пов'язана з неповним охопленням об'єму, що зміцнюється, температурними полями та полями термічних напружень. Це, ймовірно, призводить до нерівномірного, фрагментарного формування наноструктур, проте водночас підтверджує саму можливість їх утворення під дією комбінованого зміцнення.

Список використаних джерел

1. Kostyuk, G. Scientific bases of selection of sequence of layers in multilayer nano coatings on CT from a hard alloy as for continuous and in periodic cutting [Text] / G. Kostyuk, E. Kostyuk / New leading technologies in machine building: addition for proceedings XXVII International conference, 3 – 8 September. – Koblevo-Kharkov, 2017.- P. 24.
2. Kostyuk, G. I. Forecasting physico-mechanical characteristics on the size of grain coated or the basic material of detail [Text] / G. I. Kostyuk, Tymofyev A.G. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 35-37.
3. Kostyuk, G. I. Efficiency and resource of cutting tools from solid alloys when purified steel 100Cr6 (3505) [Text] / Nechyporuk M. V., Kostyuk G. I. / Proceedings of XI International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2018. – p. 29-35
4. Andreev, A. Properties of composite vacuum-arc coatings of the TiN-Ti/TiON structure / A. Andreev, G. Kostyk, Iu. Sysoiev, N. Minaiev // ПАИТ. – 2018. - №1(113). – с. 127-132.
5. Sysoiev, Iu. System for measurement the product surface Temperature for vacuum-arc coatings [Text] / Iurii Sysoiev, Yurii Shyrokyi, Kseniia Fesenko // Problems of Atomic Science and Technology (PAST). 2025. №2(156), p. 171-176.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ТА ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ
ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУР ЛАЗЕРОМ**

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Наукові дослідження постійно розширюють можливості вакуумно-дугових нанотехнологій. Наприклад, аналізується вплив зміни валентних іонів при різних частотах розряду у мікрокатодному дуговому двигуні. Також розглядаються різні оптичні, наномеханічні та фізичні властивості тонких наноструктур. Варто зазначити, що багато досліджень спрямовані на створення наноструктур на поверхнях матеріалів, проте менше уваги приділяється дослідженню процесу їх утворення в поверхневих шарах та в глибині матеріалу.

Наразі існує недостатня кількість теоретичних робіт, які дозволяють передбачати розмір нанозерен в залежності від технологічних параметрів обробки, особливо для конструкційних матеріалів авіаційних деталей. Також слід відзначити малу кількість теоретичних досліджень щодо впливу іонізуючого випромінювання на формування наноструктур у сталевих деталях. Все це підкреслює важливість і актуальність дослідження технологічних параметрів лазерного випромінювання необхідних для отримання наноструктур у поверхневих шарах вуглецевих сталей.

Для вирішення означеної вище задачі ми пропонуємо використовувати попередньо розроблену модель теоретичних процесів у зоні дії лазерного випромінювання, де при описі впливу іонізованого випромінювання на матеріал враховуються теплофізичні та термомеханічні процеси. Варто зауважити, що у цій моделі лише частково розглядаються внутрішні енергії під час утворення наноструктур. В той же час, у деяких дослідженнях розглядався вплив енергії кристалізації на окремих температурних рівнях, але об'ємний аналіз температурних полів за означеною вище моделлю з урахуванням дії енергії кристалізації проводився тільки для матеріалів з високим коефіцієнтом теплопровідності. Тому, потрібно провести подальше дослідження теплофізичних та термомеханічних характеристик різних конструкційних сталей під час формування наноструктур на їх поверхнях за допомогою лазерного випромінювання.

Все це дозволить нам підійти до розрахункових параметрів, які близькі до фізичних, що, в свою чергу, забезпечить більш точне визначення технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур у поверхневих шарах вуглецевих сталей.

Широкий Ю.В., к.т.н., доцент
i.shyrokyi@khai.edu

Торосян О.В., ст. викладач
o.tarasyan@khai.edu

Жидєєв П.Р. аспірант
zhideevpavel@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ TaN НА ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

На основі раніше розробленої нами теплової моделі [1–4] були отримані аналітичні залежності об'єму наноструктурованого шару від густини теплового потоку для умов впливу лазерного випромінювання у фемтосекундному діапазоні. Розглядався діапазон густин теплового потоку 10^{11} – 10^{16} Вт/м² при двох значеннях радіуса лазерної плями – 10^{-6} м (рис. 1) та 10^{-7} м (рис. 2). Встановлено, що для лазерної плями з радіусом 10^{-6} м твердофазне утворення наноструктур у сплаві Т12А супроводжується дещо меншими розмірами зерен у порівнянні зі сплавом Т23А за однакових параметрів теплового навантаження. Виокремлено область технологічних режимів, у межах якої формування наноструктур у сплаві Т12А потребує менших енергетичних витрат і водночас забезпечує мінімальні розміри зерен. Зокрема, при тривалості дії імпульсу порядку 10^{-10} с об'єм наноструктур досягає $(4...7) \cdot 10^{-19}$ м³. Подальше скорочення часу впливу до 10^{-12} с зумовлює зменшення об'єму наноструктур майже на порядок, при цьому мінімальні значення реалізуються саме для сплаву Т12А. При зменшенні часу до 10^{-12} – 10^{-16} с об'єм наноструктур знижується до величин у діапазоні від $1,5 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-21}$ мм³, причому й у цьому випадку найменші зерна спостерігаються в матеріалі Т12А. Зменшення розміру лазерної плями до 10^{-7} м сприяє розширенню діапазону технологічних параметрів, за яких можливе ефективне формування наноструктурованих шарів. Зокрема, при тривалості імпульсу $t = 10^{-10}$ с та густині теплового потоку $q = 10^{12}$ – 10^{14} Вт/м² відбувається активне формування наноструктур, тоді як у зоні підвищених густин світлового потоку 10^{14} – 10^{16} Вт/м² наноструктурування реалізується вже при коротших тривалостях – 10^{-16} – 10^{-14} с. Як і в попередніх випадках, більші об'єми наноструктур характерні для сплаву Т23А (рис. 2).

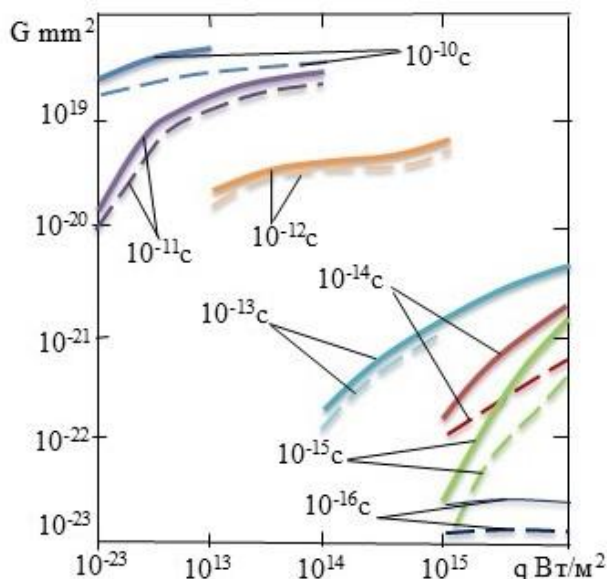


Рис 1. Залежності об'єму наноструктурованого шару від густини теплового потоку при значенні радіуса лазерної плями – 10^{-6} м

Аналіз побудованих залежностей підтверджує, що твердий сплав Т12А, до складу якого входить 12 % танталу, формує зерна меншого розміру, що зумовлює покращення його фізико-

механічних характеристик. Зокрема, спостерігається підвищення зносостійкості ріжучого інструменту, зростання ефективності та продуктивності обробки, що підтверджено у роботі [1].

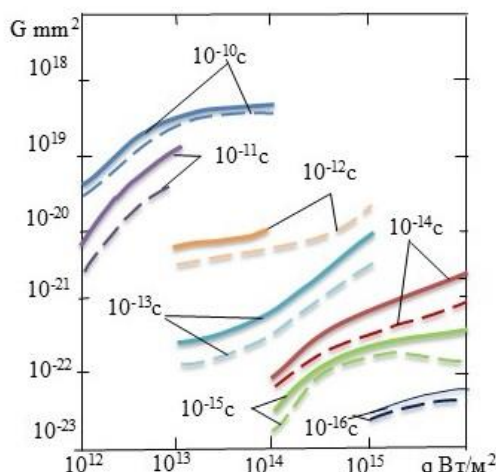


Рис 2. Залежності об'єму наноструктурованого шару від густини теплового потоку при значенні радіуса лазерної плями – 10^{-7} м

Таким чином, навіть за невеликого вмісту нітридів танталу (12 %) можна досягти суттєвого покращення експлуатаційних властивостей матеріалу. У результаті сплав із наноструктурованим поверхневим шаром демонструє вищу зносостійкість і забезпечує збільшений об'єм знімання матеріалу в межах одного циклу стійкості інструменту. Результати проведених досліджень підтверджують можливість раціонального вибору складу твердого сплаву, що забезпечує сприятливі умови для утворення наноструктур. Встановлено, що використання лазерного променя з меншим діаметром (10^{-7} м) сприяє формуванню наноструктурованих зон із більшим об'ємом у матеріалі ріжучого інструменту або його функціональному покритті. Побудовані залежності дають змогу визначити оптимальні параметри технологічного процесу та розміри лазерної плями, які забезпечують максимальну ефективність зміцнення твердого сплаву. Це, у свою чергу, створює передумови для цілеспрямованого проектування складу сплаву з урахуванням особливостей наноструктурування як фактора підвищення його експлуатаційних характеристик.

Список використаних джерел

1. Efficiency and Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class. [Text] / Kostyuk G., Popov V., Shyrokyi Y., Yevsieienkova H./ In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_58
2. Моделювання електроерозійних процесів на графітових електродах при формуванні наноструктур у плазмовому середовищі [Текст] / Широкий Ю. В.// Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ". – 2021. – Вип. 94. – С. 58-76. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.06>
3. Shyrokyi, Y., Kostyuk, G. (2022). Erosion Processes on Copper Electrodes Applied to Growth of Nanostructures in Plasma. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 494–503 https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_49
4. Andreev, A. Properties of composite vacuum-arc coatings of the TiN-Ti/TiON structure / A. Andreev, G. Kostyuk, Iu. Sysoiev, N. Minaiev // ПАИТ. – 2018. - №1(113). – С. 127-132.

8. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКИ

УДК 681.5:621.455

Бреус А.О., к.т.н., доцент
a.breus@khai.edu

Малашта П.П., аспірант
p.p.malashta@khai.edu

Баранова Є.О., бакалавр
y.o.baranova@student.khai.edu

ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІНІЦІЮВАННЯ ТА ПІДТРИМАННЯ РОЗРЯДУ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ДВИГУНА СУПУТНИКА ФОРМАТУ CUBESAT

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасна мініатюризація супутникових технологій, зокрема активне застосування супутників формату CubeSat, вимагає створення високоефективних, малогабаритних і довговічних рухових установок. У цьому контексті актуальним є розвиток плазмових двигунів, зокрема вакуумно - дугових двигунів (ВДД), що забезпечують точне маневрування, корекцію орбіти та стабілізацію апарату з мінімальними енергетичними витратами.

У межах розробки вакуумно-дугового двигуна для супутника формату CubeSat було створено тривимірну модель конструкції та виготовлено функціональний дослідний зразок. Ключовим елементом системи запуску двигуна є спеціалізоване імпульсне джерело живлення, побудоване за схемою підвищуючого перетворювача типу boost converter. Розроблене джерело (рисунк 1) функціонує в двох основних режимах: режим стабілізації вихідної напруги до моменту виникнення дуги, та режим стабілізації струму після її запалення. Завдяки реалізованому зворотному зв'язку за струмом і напругою забезпечується автоматичне підвищення вихідної напруги до заданого рівня (600 - 1200 В) у разі згасання дуги, що дозволяє підтримувати стабільне функціонування розряду. Крім того, у джерелі реалізовано режим імпульсної подачі напруги, з частотою в межах 1 - 20 Гц і тривалістю імпульсів від 2 до 20 мс, що є особливо ефективним для ініціювання розряду при обмеженому енергоспоживанні CubeSat. Після ініціювання дуги відбувається автоматичне зниження напруги та подальша стабілізація параметрів живлення відповідно до вимог до потужності двигуна.



Рис. 1. Імпульсне джерело живлення

Результати експериментальної перевірки свідчать про працездатність системи в умовах вакуумної камери та відповідність характеристик заданим параметрам. Запропонована система є перспективною для використання в малогабаритних супутниках завдяки компактності, високій ефективності та можливості адаптації до різних режимів запуску.

ДИСТАНЦІЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ МАНІПУЛЯТОРА

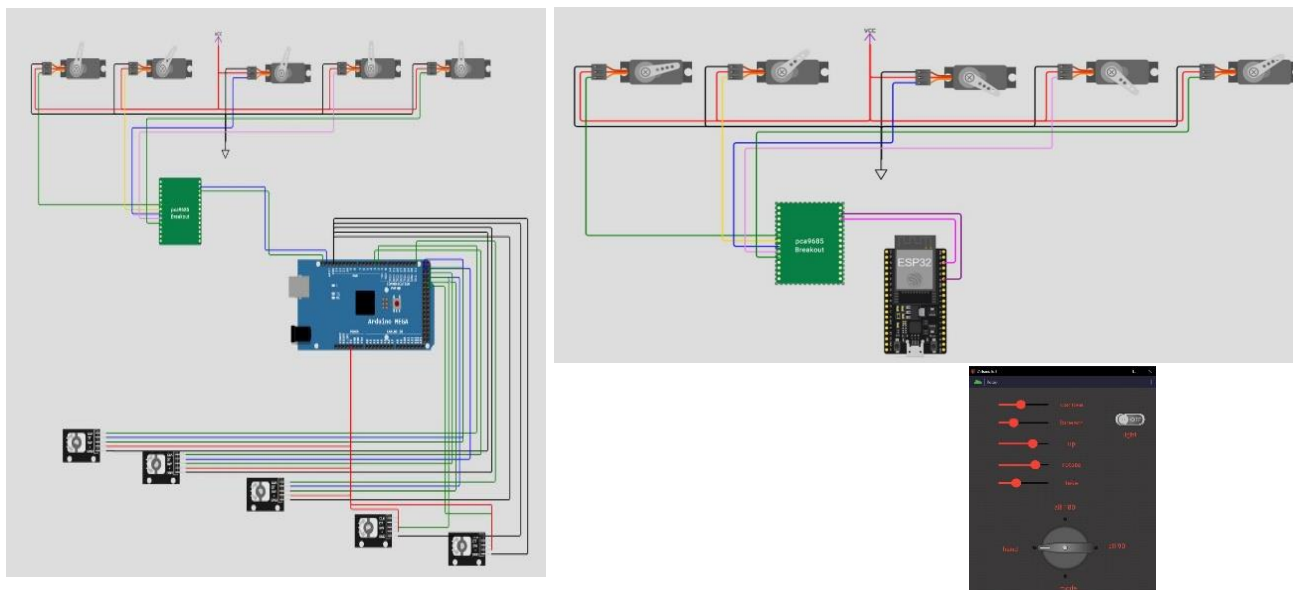
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У сучасному світі автоматизовані системи керування дедалі частіше впроваджуються в різні галузі – від побутових пристроїв до промислових роботизованих комплексів. Серед найбільш популярних інструментів для побудови таких систем є мікроконтролери та програмовані платформи, зокрема Arduino Mega та ESP32. Їхнє використання дає змогу розробляти гнучкі, масштабовані та ефективні рішення для керування виконавчими механізмами, зокрема сервоприводами. В даному дослідженні розглянуто особливості реалізації системи керування сервоприводами на базі Arduino Mega та ESP32 з використанням енкадерів і кнопок та інтерфейсу телефону або ноутбуку, а також порівняти їх функціональні можливості, ефективність та зручність розробки. За основу було взято маніпулятор (рис. 1), який має п'ять серводвигунів, котрі керуються від модуля-розширювача PCA-9685.



Рис. 1. Досліджуваний маніпулятор

Першим кроком дослідження – є створення двох моделей маніпулятора на різних платформах, а саме Arduino Mega та ESP32. Для прикладу було створено ці моделі в симуляторі Wokwi (Рис. 2, а, б).



а б
Рис. 2. Модель маніпулятора: а – на Arduino Mega, б – на ESP32.

Наступний крок – програмування роботи маніпуляторів залежно від платформи. Система на основі Arduino Mega керує сервоприводами за допомогою фізичних енкодерів та кнопок, що виставляє маніпулятор у відповідні положення. Система на основі ESP32 виконує команди оператора подані з інтерфесу на телефоні чи ноутбучі через мережу WiFi для встановлення положення кожного сервоприводу маніпулятора. В обох системах можливо сформувати автоматичний режим, який буде задавати траєкторію руху захватного пристрою в циклічному режимі.

Надалі планується порівняти обидва способи керування. Розвиток даного напрямку створює міцну основу для подальшого розвитку гнучких та високофункціональних систем керування, адаптованих під вимоги конкретних застосувань.

Список використаних джерел

1. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Wokwi : сайт. – Режим доступа: <https://wokwi.com> (03.07.25)
2. MQTT platform [Електронний ресурс] // EMQX Cloud : сайт. – Режим доступа: <https://www.emqx.com/en> (03.07.25)
3. Fatih Cemal Can Arduino based planar two dof robot manipulator [Текст] / Fatih Cemal Can // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 8. – 2018. – p. 110-117. – doi: 10.17265/2159-5275/2018.03.002
4. D. Canavese, L.Mannella, L.Regano, C. Basile Security at the Edge for Resource-Limited IoT Devices [Текст] / D. Canavese, L.Mannella, L.Regano, C. Basile // Sensors. –2024. – 24. – 590. – <https://doi.org/10.3390/s24020590>

Лукашов І.М., асистент
 Lukashev.I@gmail.com
Рузайкін В.І., к.т.н.
 v.ruzaykin@khai.edu
Косенко О.В., асистент
 o.kosenko@khai.edu

ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СПІВРОБІТНИКІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Доступність та низька вартість камер відеоспостереження дало змогу швидко та ефективно впроваджувати їх на виробництвах, де безпека працівників, цілісність обладнання та безперебійність виробничих процесів мають першочергове значення. Вони дали змогу покращити традиційні засоби безпеки та пришвидшити реагування у надзвичайних ситуаціях. В свою чергу, втома операторів, обмеження уваги при одночасному спостереженні за кількома моніторами призводять до того, що небезпека може залишитися непоміченою, а реакція на подію – запізнюю, що може коштувати людині життя. Тому обробка відеосигналу в реальному часі є актуальним завданням. Вона вже дає змогу автоматично виявляти потенційно небезпечні ситуації, передавати сигнал тривоги, записувати та маркувати критичні події для подальшого аналізу. Але варто врахувати, що не всі ділянки виробництва можуть бути повністю охоплені камерами і обов'язково будуть «сліпі» зони, де екстрена ситуація може залишитися непоміченою. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми - це використання комбінованого, підходу де людина, котра побачила надзвичайну ситуацію, зможе миттєво передати спеціальний (стандартизований) сигнал через найближчу камеру відеоспостереження, а програма розпізнає цей сигнал і виведе необхідне повідомлення на екран оператору та відправить повідомлення найближчої уповноваженої особи. Стандартизація таких сигналів для виробництва разом з розробкою програмного забезпечення – це поєднання технологій та людського контролю.

Кінцевий варіант реалізації розробки представлено на рис. 1.

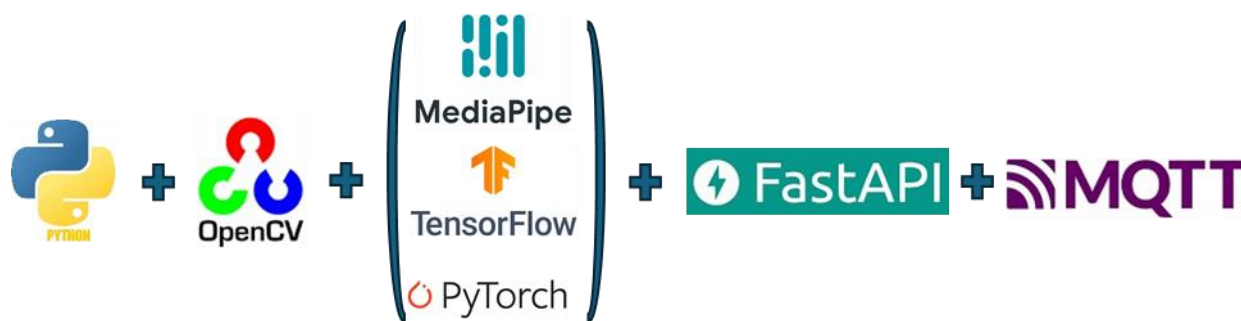


Рис. 1. Необхідні інструменти для впровадження реагування на підприємстві за допомогою комп'ютерного зору на підприємстві

Для вирішення цього завдання у якості основної мови програмування завдяки простому синтаксису, великій кількості бібліотек для комп'ютерного зору та машинного навчання логічно обрати Python. Базова бібліотека для роботи з відео, обробки зображень, фільтрації, виявлення об'єктів – OpenCv. Відстеження та розпізнавання тіла, рук, позиції людини пропонується виконувати за допомогою бібліотек TensorFlow, PyTorch та MediaPipe [1, 2] (Google). фреймворки для створення веб-інтерфейсів можна реалізувати на Flask/FastAPI, легкий протокол обміну повідомленнями публікація-підписка, який широко використовується в IoT (Industrial IoT), розумних підприємствах та автоматизації – MQTT.

Список використаних джерел

1. Lin, Y. Detection of 3D Human Posture Based on Improved Mediapipe // Lin, Y. , Jiao, X. and Zhao, L. – Journal of Computer and Communications, 11, 102-121. 2023
Doi: 10.4236/jcc.2023.112008.
2. Roggioa, F A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses // F. Roggioa, B. Trovatoa, M. Sortinoa, G. Musumeci. – A narrative review, Heliyon. – 2024. – Vol. 10, Issue 21
Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39977

Протас Є.С., студент
 e.s.protas@student.khai.edu
 Белявський О.В.,
 o.bieliavskyi@khai.edu
 Косенко О.В.,
 o.kosenko@khai.edu

СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ГОЛОВНОГО РУХУ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Розробка верстатних приводів є важливою складовою створення верстатів з ЧПК. Сучасні приводи верстатів з ЧПК мають потребу у великому динамічному діапазоні регулювання швидкості [1], регулювання моменту та навіть кутового положення шпінделя верстата. Забезпечити такі взаємозаперечливі вимоги має система керування, що передбачає різні принципи реалізації бажаних можливостей. Вирішенню саме такої задачі присвячена ця розробка. З огляду на енергетичну характеристику двигуна постійного струму (ДПС) можна зазначити, що її максимум припадає приблизно на середину механічної характеристики, що можна прослідити за співвідношенням механічної характеристики:

$$\omega = -\beta M + \omega_0. \quad (1)$$

Механічну потужність двигуна можна обчислити за співвідношенням:

$$P = M\omega = M(\omega_0 - \beta M) = M\omega_0 - \beta M^2, \quad (2)$$

де β – жорсткість механічної характеристики;

ω_0 – швидкість холостого ходу;

M – обертовий момент двигуна.

Знайдемо похідну потужності за моментом та обчислимо її координату:

$$\begin{aligned} dP/dM &= \omega_0 - \beta M; \\ 2\beta M &= \omega_0; \quad M = \omega_0/2\beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Підстановкою (3) в (1) знаходимо координату $\omega_0/2$. Координата максимуму механічної потужності приходить на половину швидкості холостого ходу, яка вважається номінальною обертовою швидкістю і відповідає номінальному обертовому моменту двигуна. При відхиленні праворуч від точки номінального моменту (момент навантаження зростає) потужність двигуна падає завдяки зменшенню швидкості обертання, при відхиленні ліворуч потужність падає завдяки зменшенню крутного моменту (рис. 1).

Аналіз відмов автоматики керування приводом головного руху свідчить про недостатню надійність силових тиристорів, які виходять з ладу в момент гальмування противмиканням приводу. Саме цей метод гальмування призводить до збільшення зворотної напруги на тиристорах, яка в момент гальмування перевищує допустиме значення і стає більшою за 1500 В.

Проблема потребує застосування більш потужних напівпровідникових приладів, але це можливо лише в рамках поточного виробництва з того приводу, що виникає проблема підбору силових елементів парами за коефіцієнтом підсилення, що можливо здійснити лише за умов заводу-виробника.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано застосувати інший принцип гальмування приводу головного руху верстата, а саме принцип електродинамічного гальмування, що може

здатися більш затратним, але більш ефективним з огляду на неушкодженість потужних силових напівпровідникових пристроїв.

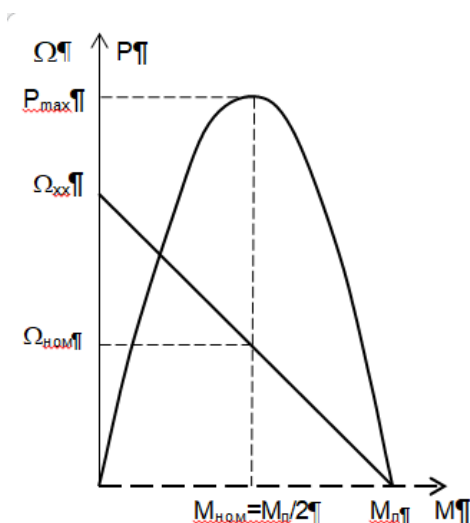


Рис. 1. Механічна та енергетична характеристики двигуна постійного струму

З метою керування режимами пуску/гальмування приводу головного руху верстата ТПК-125 на базі ПЛК фірми «ОВЕН» (м. Харків) розроблена схема пристрою керування, функціональна схема якої приведена на рис. 2.

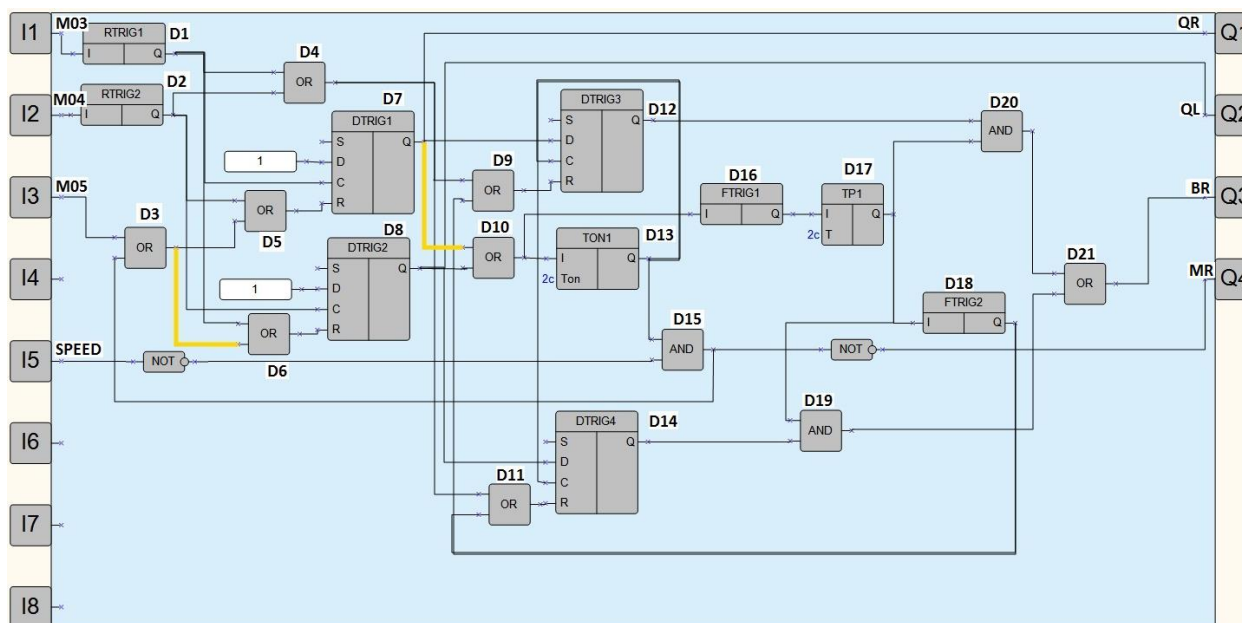


Рис. 2. Функціональна схема керування двигуном головним руху в режимі пуску/зупинки мовою FBD в САПР Owen Logic

Схема передбачає видачу сигналів дозволу на роботу СІФК (система імпульсно-фазового керування) в режимі правого (QR) та лівого (QL) обертання та сигналу дозволу режиму гальмування (BR). Окрім цього схема формує сигнал відповіді до ЧПК про включення приводу головного руху (MR) «Відповідь за М».

З боку ЧПК схема керується трьома сигналами: праве обертання (M03), ліве обертання (M04), вимкнення шпинделя (M05) та сигналом компаратора швидкості (Speed).

Схема працює наступним чином. З приходом імпульсних сигналів M03 або M04 (праве або ліве обертання) при відсутньому потенціальному сигналі M05 спрацьовують тригери D8

або D9, при чому одночасне їх включення заборонене через елементи D6, D7. Вихідні сигнали тригерів під'єднані безпосередньо до виходів контролера Q1 та Q2 і до тригеру пам'яті гальмування D12, який попередньо скинутий у початковий стан імпульсами від елементів D1 або D2, які поступають через елементи D5, D10.

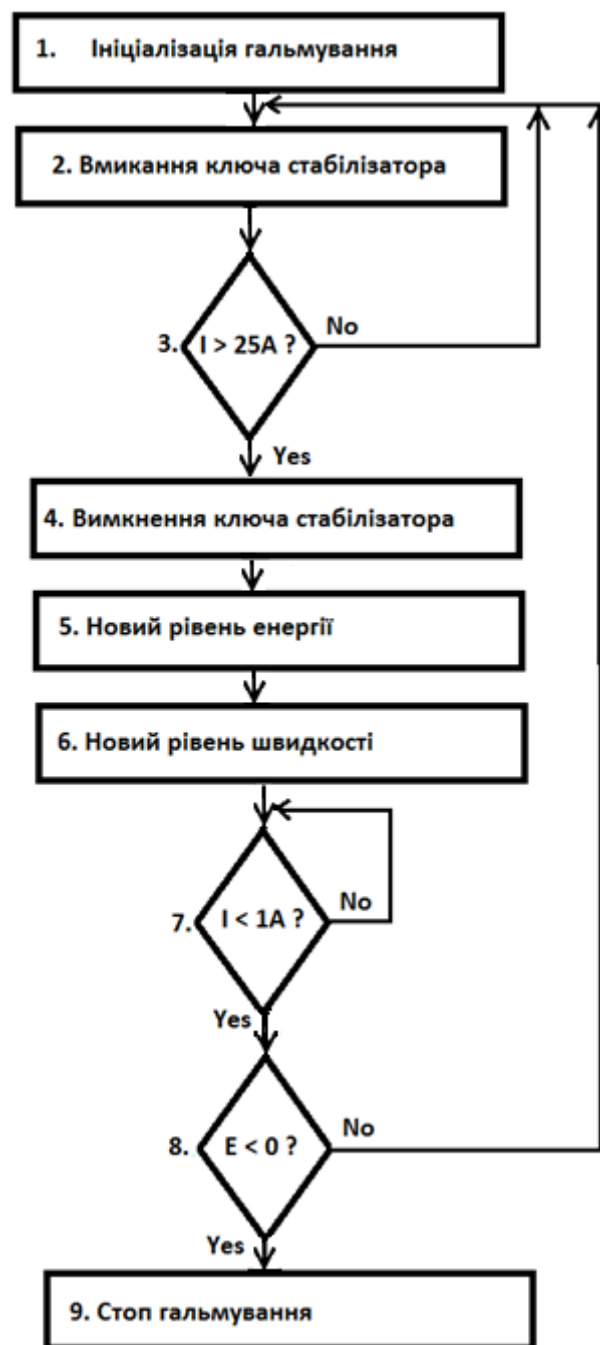


Рис. 3. Алгоритм моделювання режиму гальмування обертового руху двигуна

Таймер затримки за вмиканням D13 (TON1), який вмикається з приходом одного із сигналів тригерів D8, або D9 через елемент D11, блокує на 2С елемент D14, не дозволяючи формувати сигнал відповіді за командою М на ЧПК протягом часу встановлення номінальної швидкості обертання приводу головного руху. При штатній роботі приводу верстата через елементи D16 і D18 на вихід Q4 контролера видається сигнал MR (відповідь за М) протягом 1С, за яким ЧПК розпізнає факт виконання станком команди M03 або M04 і дозволяє подальший цикл керування. В разі відмови приводу головного руху сигнал не видається, і в цьому випадку вихідним сигналом елемента D14 через елементи D3, D6, D7 відбувається скид

тригерів D8 та D9 у початковий стан і сигнали збудження СІФУ знімаються, після чого через елемент D15 (формувавч за спадом) при наявності пам'яті вмикання через елемент D17 та D20 відбувається формування гальмівного імпульсу часом 2С (BR). Цей сигнал подається до виходу Q3 ПЛК.

Розрахунок часу гальмування двигуна пов'язаний з обчисленням перехідного процесу без навантаження верстата.

Алгоритм програми моделювання часу гальмування (рис. 3) пов'язаний з обчисленням надлишкової енергії на кожному кроці гальмівного процесу, починаючи з максимальної енергії, запасеної під час виконання технологічного процесу. Якщо скористатися даними верстата ТПК-125, то його приведений момент інерції двигуна складає $0.177 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а максимальна швидкість обертання 314 рад/сек. При цьому енергія, що буде запасена обертовими частинами верстата, складе 8725 Дж, при чому бажано цю енергію перетворити до іншої форми за час, що найменше 2 с.

Форма енергії може бути довільною, але такою, яка б не спричиняла значної переробки агрегатів верстата, встановлення багатовартісного обладнання. Прикладом може бути ШС-система стабілізатора струму гальмування, яка перетворює механічну енергію на теплову енергію ротора двигуна і таким чином зменшує її до нуля.

Алгоритм моделювання роботи ключа починається ініціалізацією змінних гальмування – це швидкість та відповідна їй енергія обертання шпинделя (блок 1). Блок 2 здійснює вмикання ключа системи гальмування та вмикає тригер стабілізатора струму. Блок 3 перевіряє чи досягає струм максимуму: при відповіді «ні» алгоритм зациклюється, при відповіді «так» відбувається розмикання ключа (блок 4), обчислення нового рівня енергії (блок 5) та обчислення нової обертової швидкості (блок 6) після чого йде перевірка досягнення струмом нижньої границі гістерезиса (блок 7). В разі негативного рішення відбувається зациклювання алгоритма, в разі позитивного – перехід до оператора 8. Оператор 8 визначає чи вичерпана запасена енергія. В разі «так» відбувається припинення роботи алгоритма, в разі «ні» відбувається перехід до блоку 2.

Таким чином в ході проведеного дослідження були виявлені найчастіші причини відмов приводу головного руху верстата ЧПК ТПК-125 та запропонований метод вирішення проблеми за умови застосування електродинамічного гальмування приводу. Передбачена заміна релейної автоматики верстата програмованим логічним контролером (ПЛК), наведена розробка керуючої програми мовою FBD в САПР «Owen Logic».

Список використаних джерел

1. Воскобойник, В. Е. Основи електропривода виробничих машин та комплексів: навч. посіб./ В. Е. Воскобойник, В. А. Бородай, Р. О. Боровик, О. Ю. Нестерова – Дніпр: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 254 с.

ДИСТАНЦІЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У сучасних умовах розвитку промислової автоматизації зростає потреба у мобільних роботизованих системах, здатних виконувати транспортні, інспекційні та моніторингові функції в реальному часі. Одним із перспективних напрямів є створення прототипів автономних мобільних платформ на базі доступних мікроконтролерів та сенсорних модулів, які дозволяють моделювати поведінку повноцінних виробничих роботів у масштабованому вигляді. Зокрема, робот на чотириколісному шасі з ультразвуковим та оптичними датчиками може слугувати основою для подальших розробок у сфері внутрішньоцехової логістики, автоматизованого контролю зони обслуговування та візуального аналізу простору.

Мобільна роботизована платформа (рис. 1) з чотириколісним приводом, оснащена драйвером двигунів L298N, ультразвуковим дальноміром із сервомеханізмом для сканування простору та оптичними датчиками виявлення об'єктів, є перспективною основою для впровадження у виробничих процесах з метою автоматизації внутрішньоцехових операцій.

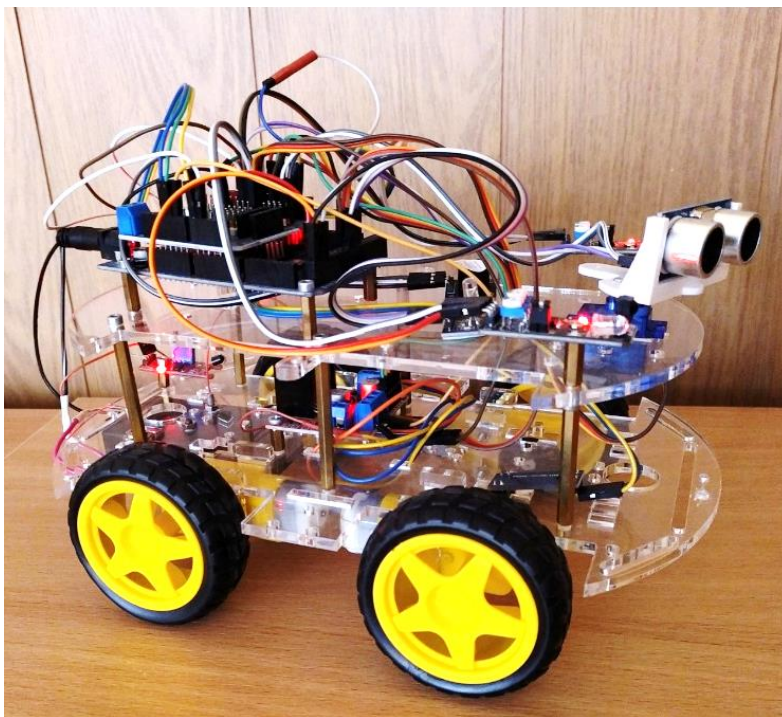


Рис. 1. Мобільна роботизована платформа

Збільшення габаритів, вантажопідйомності та енергетичної автономності цієї платформи дозволяє розглядати її як прототип автономного транспортного засобу (AGV), здатного здійснювати доставку дрібних компонентів, здійснювати патрулювання виробничих зон, контролювати наявність об'єктів або людей у небезпечних зонах, а також здійснювати базовий візуальний моніторинг.

Завдяки використанню адаптивних сенсорних систем та алгоритмів ухилення від перешкод, така роботизована система може функціонувати в умовах змінної виробничої обстановки, забезпечуючи безпечну взаємодію з оточенням. Подальша інтеграція з

бездротовими технологіями зв'язку, візуальними сенсорами (наприклад, камерами або сканерами QR-кодів) та системами обробки даних дозволяє розширити функціональність платформи для виконання інспекційних, логістичних, навчально-демонстраційних та моніторингових завдань в індустріальному середовищі.

Моделювання роботизованої платформи здійснюється з урахуванням модульного принципу побудови системи, що передбачає окреме віртуальне проєктування її основних функціональних підсистем: руху, сенсорного сприйняття та керування.

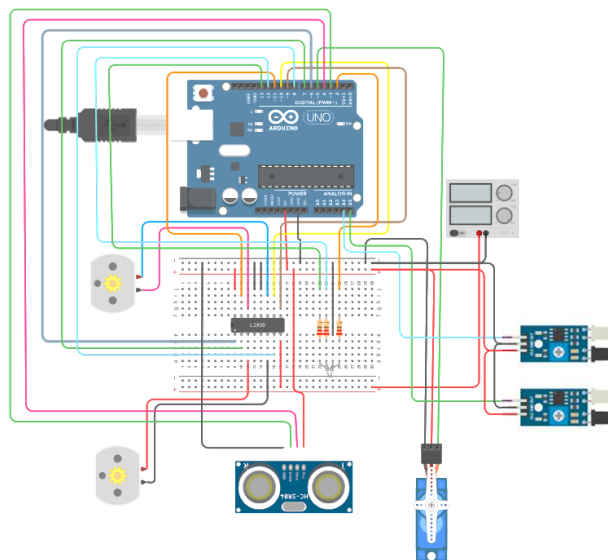


Рис. 2. Модель колісного робота на Arduino Mega.

Моделювання роботизованої платформи здійснюється з урахуванням модульного принципу побудови системи, що передбачає окреме віртуальне проєктування її основних функціональних підсистем: руху, сенсорного сприйняття та керування. В середовищі Wokwi або Tinkercad реалізується електронна схема, яка включає Arduino Uno (або ESP32), драйвер L298N для керування двигунами, ультразвуковий дальномір (HC-SR04), оптичні інфрачервоні сенсори, сервопривід (для обертання датчика) та допоміжні компоненти (живлення, резистори, індикатори). Схему доповнюють програмним кодом на мові Arduino C/C++, який дозволяє моделювати поведінку системи: аналізувати сигнали сенсорів, керувати обертанням коліс та змінювати напрямок руху залежно від виявлених перешкод.

Такий підхід дозволяє перевірити алгоритми навігації, уникнення перешкод, а також логіку обробки даних від датчиків у віртуальному середовищі без ризику пошкодження реального обладнання. У разі використання Wokwi забезпечується вища точність симуляції з підтримкою ESP32, WebSocket-зв'язку та інших сучасних протоколів. У Tinkercad перевагою є візуальна простота та швидкий старт для початкового моделювання. Отримані результати можуть слугувати базою для подальшого апаратного впровадження та адаптації прототипу до виробничих умов.

Список використаних джерел

1. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Wokwi : сайт. – Режим доступу: <https://wokwi.com> (03.07.25)
2. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Tinkercad : сайт. – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com> (03.07.25)

ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНИМИ ПРИВОДАМИ ЧЕРЕЗ КОНТРОЛЕРИ ARDUINO АБО ESP32

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Пневматичні приводи – це один з розповсюджених типів приводів на виробництві. При формуванні системи керування на базі промислових логічних контролерів (ПЛК) використовується обладнання з високого цінового діапазону. Для створення бюджетних систем керування можливе використання контролерів іншого класу, таких як Arduino Uno, Mega або ESP32 і її модернізації. Для даних контролерів є багато різних модулів (сенсори, реле тощо) для зручного користування, що полегшує створення реальних проєктів.

Першим кроком при створенні проєкту рекомендується розробити модель і перевірити працездатність коду та адекватність алгоритму роботи пневматичних приводів. Передовим розробником симуляторів для пневматики є фірма FESTO і її продукт FluidSIM-P. Даний симулятор дозволяє сформувати повноцінну пневматичну схему і сформувати взаємозв'язок руху пневматичних циліндрів і натискання ними на кінцеві перемикачі, які подають сигнали до реле (якщо релейна логіка) або до входів ПЛК. Використання в даному симуляторі контролерів з лінійки Arduino та ESP32 не передбачено, тому пропонується використати безкоштовні симулятори для електричних кіл з умовою, що пневматична частина буде імітуватись за допомогою реле. Подання команди для руху пневматичного циліндру від контролеру на реле, його виходи імітують натискання кінцевих вимикачів і подають відповідні сигнали до контролеру. Таким чином з'являється можливість для симуляції та перевірки коду, написаного для контролеру. Після перевірки та налаштування моделі можна переходити до збирання стенду або обладнання і налаштовувати елементи з ручним регулюванням (дроселі тощо).

Для порівняння розглянемо середовище моделювання Thinkercad та Wokwi. Перший сервіс – це онлайн платформа яка має широкую номенклатуру бібліотечних елементів. Контролер Arduino UNO. Можна використати декілька контролерів для одного проєкту і велика база бібліотечних електричних елементів і вимірювальних пристроїв. Допустимо, що імітуємо систему керування циліндром від моностабільного розподільника. В такому випадку модель для налагодження алгоритму роботи програми матиме наступний вигляд (рис. 1).

у – вхід-керування реле приєднаний до Arduino на 13 pin,

х – кінцевий вимикач висунутого положення пневматичного циліндру, приєднаний до Arduino на 11 pin,

пх – кінцевий вимикач втягнутого положення пневматичного циліндру, приєднаний до Arduino на 10 pin.

Виконаємо аналогічну схему в симуляторі Wokwi з відповідним приєднанням (рис. 2). В даному симуляторі реле знаходиться в модулі і має захисні та індикаційні елементи, тому схема виглядає простіше і має менше елементів.

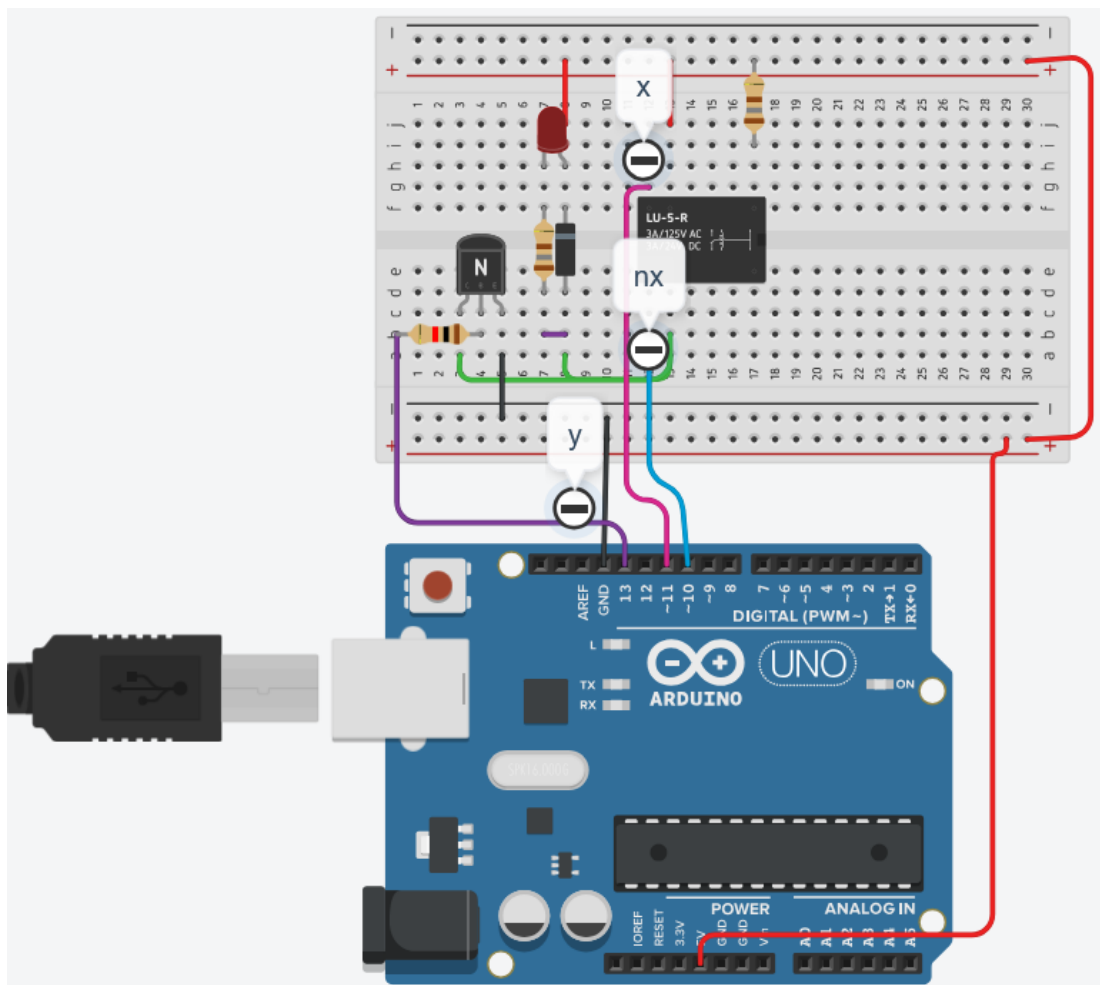


Рис. 1. Модель для налагодження коду керування пневматичного циліндра від моностабільного розподільника в середовищі Tinkercad

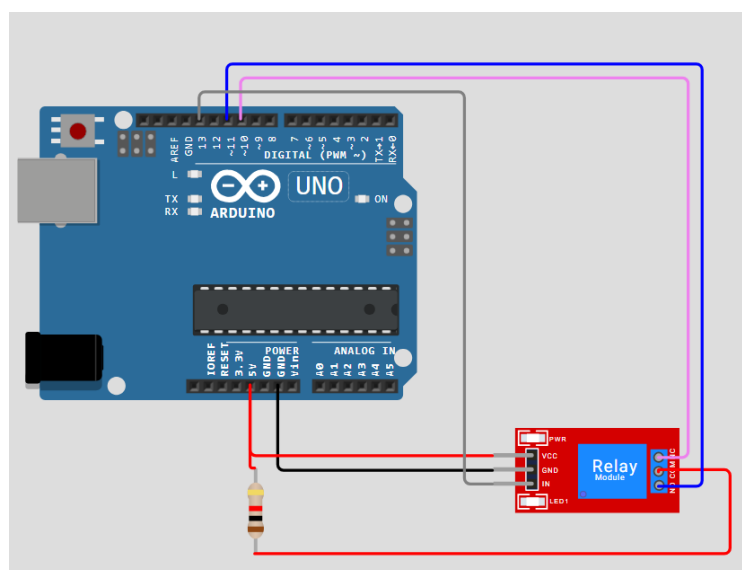


Рис. 2. Модель для налагодження коду керування пневматичного циліндра від моностабільного розподільника в середовищі Wokwi

Моделювання для контролера ESP32 можливе лише в Wokwi, тому його розглянемо в наступній роботі.

Провівши порівняння двох симуляторів можна зробити висновок для імітації моделювання системи керування пневматичними приводами зручніше використовувати симулятор Wokwi, який має більш зручні елементи. Але якщо виникає необхідність скористатись вимірювальними елементами (осцилограф, вольтметр, амперметр), то користуємось Tinkercad і будуємо розширену схему.

Список використаних джерел

1. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Tinkercad : сайт. – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com> (05.07.2025)
2. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Wokwi : сайт. – Режим доступу: <https://wokwi.com> (05.07.2025)

9. ІННОВАЦІЙНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.272.34

Федорович О.Є., д.т.н., професор
oe.fedorovich@gmail.com

Попов А.В., к.т.н., доцент
apv_juki@ukr.net

Пісклова Т.С., м.н.с.
kafius@ukr.net

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗАПОБІГАННЯ СТАРІННЯ ТЕХНОГЕННИХ СИСТЕМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Багатоваротістні складні техногенні системи створювались на довгий термін існування в умовах прогнозу поведінки навколишнього середовища та політико-економічного стану минулих років. Але, мінливість політико-економічного середовища та різкі зміни глобального клімату призвели до погіршення умов експлуатації таких систем та прискоренню їх деградації, що впливає на скорочення терміну їх існування. Тому, актуальна тема доповіді, в якій представлені результати дослідження стратегій управління старінням складних техногенних систем. Метою дослідження є створення комплексу моделей та інформаційної технології для планування проектів щодо запобігання старіння техногенних систем. Представлені можливі стратегії управління старінням, які пов'язані з продовженням терміну існування техногенної системи з урахуванням значення показників: вартість (W), продовження терміну експлуатації (T), ризику проекту (R). Аналізуються та формуються суттєві фактори, які впливають на стан старіння (зовнішні, внутрішні) та деградацію окремих компонент системи. Запропоновано метод виявлення найбільш застарілих компонент техногенної системи заснований на якісних оцінках експертів. За допомогою лінгвістичних змінних, створюється оптимізаційна модель для мінімізації витрат, які пов'язані з превентивними діями та заходами, спрямованими на продовження терміну експлуатації складної системи. Велику увагу приділено критичним техногенним системам, для яких старіння суттєво впливає на навколишнє середовище та людей. Створена оптимізаційна модель мінімізації ризиків впливу критичних техногенних систем на довкілля (атомні електростанції, небезпечне виробництво, система енергопостачання, інфраструктура великих міст, тощо). Аналізується послідовність дій щодо управління старінням техногенних систем у вигляді логістичного ланцюга: аналіз стану системи – оцінка факторів впливу на старіння – виявлення застарілих компонент системи – формування стратегії управління старінням – проведення превентивних дій та заходів до продовження терміну експлуатації техногенної системи. Запропонований підхід дозволяти планувати проекти, які спрямовані на управління старінням техногенних систем.

Наукова новизна дослідження пов'язана з розробкою оригінальних моделей для створення прикладної інформаційної технології управління старінням техногенних систем.

Список використаних джерел

1. Fedorovich, O. Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise / O. Fedorovich, O. Uruskiy, Yu. Pronchakov, M. Lukhanin // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2021. – № 1. – С. 150-157. <https://doi.org/10.32620/reks.2021.1.13>.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
O.Fedorovych@khai.edu
Губка О.С., к.т.н., доцент
O.Gubka@khai.edu
Малєєв Л.В., аспірант
L.Maleev@khai.edu

МЕТОД ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНО-КОМПОНЕНТНОГО ПРОЄКТУВАННЯ НОВИХ ЗРАЗКІВ ТЕХНІКИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Зміни щодо умов використання існуючої військової техніки, в сучасній гібридній війні, потребують її модернізації, яку необхідно проводити у стислі терміни [1]. Тому, актуальна розробка нових підходів до оновлення існуючої техніки для забезпечення військових сучасною зброєю.

Актуальність дослідження пов'язана з розробкою нового адаптивно-компонентного методу для модернізації, а також розробки сучасних зразків озброєння.

Постановка проблеми. Скорочення життєвого циклу створення техніки, особливо потрібно в умовах сучасної війни. Зміни функціоналу, поліпшення бойових характеристик, потребують адаптації існуючої техніки до нових умов використання. Існуючі підходи щодо створення техніки не задовільняють військових, яким потрібна сучасна техніка для рішення актуальних оперативних-тактичних завдань на полі бою. Тому, потрібне створення нових підходів щодо модернізації військової техніки зі скороченням часу та строків серійного виготовлення.

Метою дослідження є розробка нового методу проєктування, який заснований на компонентному підході та адаптації існуючої архітектури виробу до нових вимог використання. Проаналізовані особливості компонентного підходу. Виявлені такі типи компонент: компоненти, які використовують без змін, компоненти, потрібні в адаптації (модернізації) та нові компоненти. Але, нові компоненти потребують повного циклу розробки, що впливає на час та ризики проєкту. Тому, необхідно створення компромісу між «старим» та «новим».

Створена оптимізаційна модель, яка дозволяє сформулювати компроміс, з урахуванням обмежень щодо часу, ризику та ресурсів проєкту для створення нової архітектури військового виробу. Використання розробленої бази прецедентів, щодо існуючих зразків техніки, дозволяє, шляхом цілеспрямованого пошуку, сформулювати потрібні компоненти проєкту. Проведено імітаційне моделювання логістичних дій щодо створення нових зразків виробів, в умовах обмежених можливостей та ризиків проєктування.

Результати дослідження дозволяють скоротити життєвий цикл створення нових зразків військової техніки, за допомогою розробленого адаптивно-компонентного методу проєктування. Це дозволяє підвищити обороноздатність військових на полі бою.

Список використаних джерел

1. Fedorovich, O., Malieiev, L., Pisklova, T., & Polishchuk, Y. (2025). Method of adaptive component-based design of unmanned aerial vehicles suitable for military missions. Aerospace Technic and Technology, no. 3, pp. 96-106. doi:<https://doi.org/10.32620/akt.2025.3.09>

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu

Попов А.В., к.т.н., доцент
apv_juki@ukr.net

Федорович В.А., аспірант
kafius@ukr.net

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ НА УРАЖЕННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВІД ДРОНОВИХ АТАК ПРОТИВНИКА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасна логістична інфраструктура (транспорт, енергетика, тощо) є критична по відношенню до атакуючих дій противника. Використання БПЛА, у вигляді рою ударних дронів, дозволяє виявити та наносити ураження по логістичним об'єктам з урахуванням наявності загрозливих вразливостей [1]. Тому, актуальна тема доповіді, в якій представлені результати дослідження впливу вразливостей на ураження об'єктів критичної інфраструктури від дронів атак противника.

Постановка проблеми. Формування захисту об'єктів логістичної інфраструктури, є актуальною проблемою, тому що оборона забезпечить стабільність роботи підприємств подвійного призначення. В роботі проведено аналіз факторів, які впливають на старіння та деградацію логістичних об'єктів. Виявлено необхідність виділення загрозливих вразливостей, які використовуються противником, як цілі для ураження.

Метою дослідження є створення комплексу моделей, які дозволяють проаналізувати вплив загрозливих вразливостей на можливе ураження критичних об'єктів від атакуючих дій противника, з використанням ударних дронів. За допомогою віртуального експерименту та експертних оцінок військових, виявлені основні фактори формування загрозливих вразливостей (деградація в часі, вплив зовнішнього середовища, порушення експлуатації, тощо). Формується множина можливих варіантів для вибору тих вразливостей, які є найбільш загрозливими, для подальшої охорони логістичних об'єктів від атак противника. Створена оптимізаційна модель розподілу оборонного потенціалу, за місцями розташування загрозливих вразливостей, у вигляді протидронів засобів. При цьому, враховуються обмежені можливості щодо створення оборони. Розроблена імітаційна модель дослідження руху ударних дронів противника до місць розташування загрозливих вразливостей для оцінки рівня ураження. Імітуються оборонні дії щодо захисту від дронів атак противника.

Використані математичні методи та моделі: системний аналіз для формування факторів, пов'язаних з виникненням загрозливих вразливостей об'єктів критичної інфраструктури; методи експертного оцінювання, з використанням віртуального експерименту; методи оптимізації; методи імітаційного моделювання.

Результати дослідження дозволяють виявити загрозливі вразливості об'єктів логістичної інфраструктури, сформувавши потрібний оборонний потенціал для захисту критичних об'єктів, провести раціональний розподіл засобів оборони за об'єктами логістичної інфраструктури. Це дозволяє сформувавши превентивні заходи щодо створення оборони об'єктів критичної інфраструктури від атакуючих місій ударних дронів противника.

Список використаних джерел

1. Моделі дослідження стійкості високотехнологічних виробництв в сучасних політико-економічних умовах / О. Є. Федорович, О. В. Сломчинський, А. В. Єлізева, Л. С. Смідович, О. С. Яшина / Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2023, № 4(188), С. 92-100.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu
Рибка А.В., аспірант
kafius@ukr.net
Соловйов В.С., аспірант
kafius@ukr.net

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЛАНУВАННЯ ВІДНОСНО БЕЗПЕЧНИХ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТУ РОЮ УДАРНИХ ДРОНІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний технологічний інструмент гібридної війни, у вигляді рою атакуючих ударних дронів, постійно удосконалюється в умовах агресивних дій противника.

Тому, актуальна тема проведеного дослідження, в якому зроблена розробка алгоритму та моделі формування відносно безпечних маршрутів польоту ударних дронів до цілей, з урахуванням протидронових дій противника [1].

Проблема пов'язана з формуванням противником системи захисту цілей, яка створюється за допомогою протидронових засобів (ППО, РЕБ, тощо). Тому, необхідно формувати рух ударних дронів з обльотом можливих зон знищення.

Метою дослідження є створення алгоритму, який використовується в імітаційній моделі та дозволяє сформувати відносно безпечні маршрути польоту рою ударних дронів до цілей противника. Алгоритм заснований на генерації хвиль заявок (клонів) в імітаційному моделюванні, які конкурують між собою таким чином, що фільтрується та формується траєкторія руху з мінімальним ризиком. Сформована мапа польоту з навігаційними точками для контролю руху ударних дронів. В зонах, в яких розташовані протидронові засоби противника, мають ризики знищення ударних дронів. Ці ризики використовуються для формування маршруту, з урахування даних, які отримані після проведення розвідки. Тому, пошук траєкторії руху, з мінімальним ризиком, формується за актуальними даними та дозволяє забезпечити відносно безпечний шлях рою ударних дронів до цілей противника. Імітаційне моделювання дозволяє, у часі, сформувати план польоту рою ударних дронів. Далі, сформований план використовується, як основа для розробки польотних завдань в системі управління рухом роєм ударних дронів.

Використані математичні методи та моделі: системний аналіз для формування послідовності дій щодо планування маршруту польоту рою ударних дронів; моделювання вибору актуальних цілей противника; модель формування протидронових зон противника; алгоритм формування відносно безпечних маршрутів польоту; оптимізаційна модель для створення маршруту з мінімальним ризиком; імітаційна модель для формування послідовності проходження маршруту; модель ураження цілей; модель ураження ударних дронів; мультиагентна модель дослідження процесу управління рухом рою ударних дронів.

Запропонований алгоритм та розроблена імітаційна модель дозволяє сформувати маршрут польоту рою ударних дронів в умовах створених противником протидронової системи захисту цілей.

Список використаних джерел

1. Modeling of strike drone missions for conducting wave attacks in conditions of enemy anti-drone actions / O. Fedorovich, D. Krytskyi, M. Lukhanin, O. Prokhorov, Yu. Leshchenko // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2025, № 1 (113), С. 29-43. DOI: 10.32620/reks.2025.1.02

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu

Рибка К.О., к.т.н., доцент
kafius@ukr.net

Коновалова О.В., ст. викладач
o.konovalova@khai.edu

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ДІЙ ЩОДО СТВОРЕННЯ ОБОРОНИ ОБ'ЄКТІВ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Гібридна війна призвела до необхідності створення оборони щодо об'єктів подвійного призначення (ОПП) (промислові підприємства, логістичні центри, енергетичні об'єкти, тощо) від дронів атак противника. Немоżliвість забезпечити повноцінну оборону цих ОПП від атакуючих дій противника потребує створення охорони для найбільш важливих, для економіки країни, об'єктів [1]. Тому, актуальна тема доповіді, в якій представлені результати дослідження щодо моделювання оборонних дій для найбільш важливих об'єктів ОПП.

Постановка проблеми. Відсутність потрібного оборонного потенціалу, для протидії атакуючим місіям противника, з використанням хвиль рою ударних дронів, призвела до необхідності моделювання логістичних дій щодо створення охорони ОПП, в умовах обмежених можливостей. Це вимагає проведення аналізу множини ОПП для виділення найбільш важливих об'єктів при створенні потрібного оборонного потенціалу.

Метою доповіді є розробка комплексу моделей, які дозволять сформувавши раціональний розподіл засобів протидронної боротьби (ЗПБ) для охорони важливих об'єктів ОПП. Проведено аналіз щодо виявлення актуальних ОПП, для яких буде створена охорона, з використанням якісних оцінок експертів та лексикографічного впорядковування варіантів. Проведена оцінка можливого ударного потенціалу рою дронів, який буде використаний противником в атакуючій місії. З урахуванням ударного потенціалу противника та обмеженого оборонного потенціалу, проведена оптимізація розподілу ЗПБ за місцями розташування об'єктів ОПП, з урахуванням їх пріоритетності. Створена імітаційна модель для аналізу, у часі, руху ударних дронів противника з можливим ураження об'єктів ОПП.

Використані математичні методи та моделі: метод системного аналізу для формування послідовності превентивних заходів щодо створення охорони критичних об'єктів подвійного призначення від хвильових атак ударних дронів противника; метод експертного оцінювання для виявлення актуальних об'єктів подвійного призначення для створення їх охорони; метод лексикографічного впорядковування варіантів для формування пріоритетних, для оборони, об'єктів подвійного призначення; метод оптимізації та раціонального розподілу оборонного потенціалу за місцями розташування об'єктів подвійного призначення, з урахування ударного потенціалу бойових дронів противника; метод імітаційного моделювання руху ударних дронів до місць розташування об'єктів подвійного призначення.

Висновок. Результати дослідження дозволяють виявити актуальні об'єкти ОПП для проведення охоронних дій, сформувавши потрібний оборонний потенціал захисту від хвильових атак рою ударних дронів противника

Список використаних джерел

1. Моделі дослідження стійкості високотехнологічних виробництв в сучасних політико-економічних умовах / О. Є. Федорович, О. В. Сломчинський, А. В. Єлізева, Л. С. Смідович, О. С. Яшина / Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2023, № 4(188), С. 92-100.

Архіпов О.В., аспірант
o.v.arkhipov@khai.edu
Кривенко С.С., к.т.н., докторант
s.kryvevko@khai.edu
Лукін В.В., д.т.н., професор
v.lukin@khai.edu

АВТОМАТИЗАЦІЯ СТИСНЕННЯ ТРИКАНАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ БЕЗ ВІЗУАЛЬНО ПОМІТНИХ ВТРАТ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В багатьох системах неруйнівного контролю, робототехніки, комп'ютерного зору, екологічного моніторингу тощо широко використовуються цифрові зображення, як напівтонові, так і кольорові або триканальні (для видимого діапазону мультиспектральних даних) [1, 2]. Типовим для таких зображень є те, що їх середній розмір збільшується завдяки покращенню розрізняювальної здатності систем формування зображень (СФЗ). Водночас збільшується й загальна кількість таких зображень, створюються їх бази для навчання нейромереж, статистичного аналізу або тестування методів обробки [2]. Це зумовлює необхідність ефективного стиснення зображень, щоб забезпечити їх зберігання або передачі по лініях зв'язку з обмеженою пропускнуою здатністю [3]. Стиснення зазвичай виконується з втратами, бо коефіцієнт стиснення (КС) для методів стиснення без втрат зазвичай не задовольняє користувачів. Втім, для методів стиснення з втратами виникає задача швидкого забезпечення такої якості стисненого зображення, яке задовольняє користувачів або є прийнятною для подальшої автоматичної обробки кожного конкретного зображення, наприклад розпізнавання об'єктів на цьому зображенні [4]. Тож потрібні адекватні метрики якості, ефективні методи стиснення й засоби швидкого і точного забезпечення бажаної якості.

Щодо ефективності стиснення з втратами, то групою найкращих на даний час кодерів є ті, що використовуються в стандарті стиснення відео HEVC [5], зокрема better portable graphics (BPG) [6, 7]. Зазначимо, що BPG-кодер має як версію для стиснення напівтонових зображень, так і три версії для стиснення кольорових або триканальних зображень – 4:4:4, 4:2:2 та 4:2:0, де дві останні для підвищення КС використовують прорідження в кольорових компонентах, враховуючи той факт, що чутливість людського ока до спотворень кольору менша, ніж чутливість до спотворень інтенсивності. Втім, таке прорідження в будь-якому випадку негативно впливає на візуальну якість [7]. Тож бажано з'ясувати взаємозв'язок між якістю стиснених зображень та КС для трьох зазначених версій BPG-кодеру.

Потрібно зазначити, що якість стиснених зображень може характеризуватись різними метриками. Найбільш поширеною та відомою є пікове відношення сигнал-шум (peak signal-to-noise ratio - PSNR), але ця метрика, безумовно, не є найкращою для того, щоб кількісно характеризувати візуальну якість, яка є важливим показником, якщо стиснене зображення підлягає візуалізації чи візуальному аналізу. В цьому випадку доцільно використовувати такі метрики як HaarPSI, MDSI, FSIMс та інші [7], для яких рангова кореляція між цими метриками та осередненою думкою людей (mean opinion score - MOS) для відомих баз зображень із спотвореннями, що відповідають стисненню з втратами або аналогічним, суттєво перевищує 0.9. Надалі аналіз будемо проводити для метрики HaarPSI [8], яка має наступні позитивні риси: 1) можливість швидкого розрахунку; 2) майже лінійний зв'язок з MOS; 3) досить точне значення порогу непомітності внесених спотворень (ПНВС) [7].

Тут треба відзначити, що ПНВС або точка ледь помітних спотворень (ТЛПС) [9] є важливими показниками, бо дозволяють водночас досягати досить високих значень КС та такої якості, яка зазвичай задовольняє користувачів для багатьох застосунків. Втім, для різних зображень візуальна непомітність спотворень може досягатись при суттєво різних значень КС (в залежності від складності зображення). Дослідження, що проведені в [7] для триканальних зображень дистанційного зондування, показали, що ПНВС для метрики HaarPSI становить

приблизно 0,95, що для VPG-кодера спостерігається для значення параметра Q, що керує стисненням (ПКС), що дорівнює 28 для версії (режиму стиснення) 4:4:4, 27 для версії 4:2:2 та 26 для версії. Нагадаємо, що збільшення Q призводить до більшого КС та меншої якості, але при цьому спостерігається суттєвий розкид значень HaarPSI та КС для фіксованого Q – дивись приклад, запозичений з нашої роботи [7], на рис. 1.

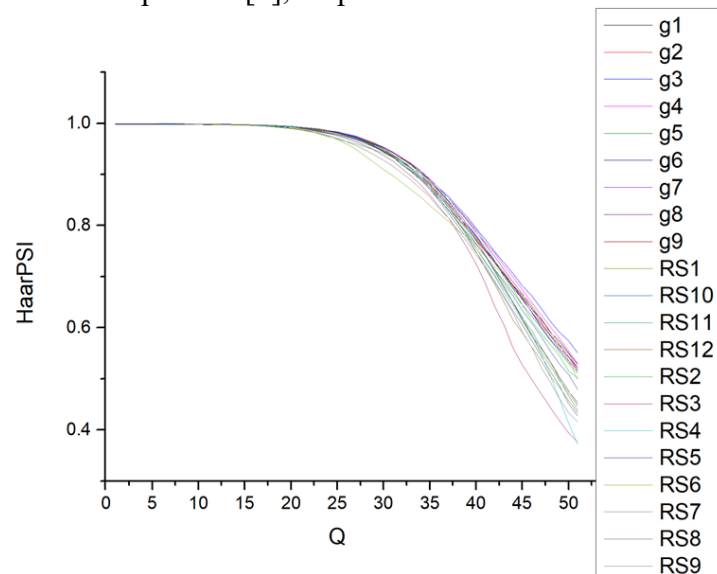
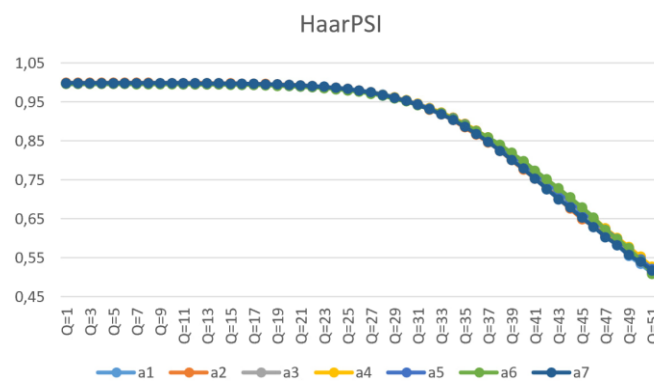
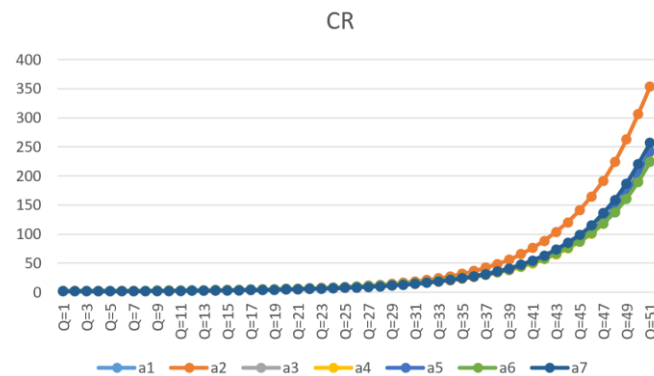


Рис. 1. Залежності HaarPSI від Q для 21 тестового зображення для режиму 4:2:2

Нами були отримані залежності HaarPSI від Q ще для 7 тестових триканальних зображень для режиму 4:2:2. Вони представлені на рис. 2,а.



а



б

Рис. 2. Залежності HaarPSI (а) та КС (б, compression ratio – CR) від Q для семи додаткових тестових триканальних зображень для режиму 4:2:2

Як можна побачити (рис. 2,б), для $Q \leq 17$ якість майже не змінюється і можна казати про стиснення майже без втрат (СМБВ, в англійській літературі часто використовується термін

near-lossless compression). При $Q < 7$ КС коливається у межах 1,6–2,2, при $Q=25$ вже зазвичай перевищує 8, тобто стає суттєвим, і, відповідно, стиснення без візуально помітних втрат доцільно використовувати. Для найбільших можливих значень Q (49-51, Q може бути лише цілим) КС сягає сотень (рис. 2,б), але й внесені спотворення при цьому є дратівливими. Залежності HaarPSI від Q для двох інших режимів наведені на рис. 3. На перший погляд вони можуть здатися майже однаковими, але більш детальний аналіз свідчить про наступне. По-перше, інтервал, коли значення метрики майже не змінюється, для режиму 4:4:4 більш широкий, а значення метрики трохи більші. Для $Q > 35$, тобто для помітних спотворень, спостерігається деякий розкид значень метрики в залежності від складності зображення. Основна різниця полягає у значеннях КС, особливо при малих значеннях Q ($Q < 7$). Для режиму 4:4:4 при цьому КС дуже рідко перевищує 2, а для режиму 4:2:0 значення КС зазвичай більші за 2, але не перевищують 4. Тож можна казати про стиснення майже без втрат.

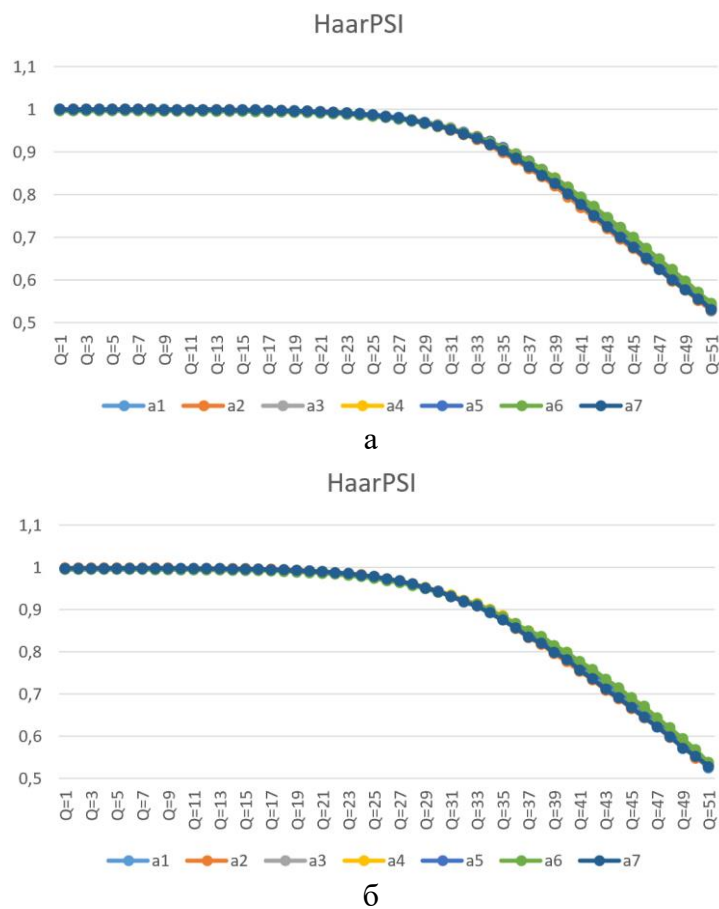


Рис. 3. Залежності HaarPSI від Q для семи додаткових тестових триканальних зображень для режимів 4:4:4 (а) та 4:2:0 (б)

Для середніх значень Q (20-30) можна казати про те, що при фіксованому Q режим 4:2:0 забезпечує найбільші значення КС, а режим 4:4:4 – найменші. Різниця сягає 10-20%. Режиму 4:2:2 відповідають проміжні результати. Втім, при великих значеннях Q (49-51) режими 4:2:2 та 4:2:0 мають приблизно однакові значення КС, а режим 4:4:4 – на декілька відсотків менші. Тож вибір режиму фактично визначається пріоритетом вимог до стиснення. Процедура забезпечення бажаної якості теж існує – це двоетапний підхід [10, 11]. Детальний аналіз показує, що в більшості випадків значення Q на другому етапі (уточнення) змінюється на 1 чи 2 (іноді другий етап взагалі не потрібен). Але завдяки другому етапу вдається у рази (3-7 разів) зменшити середньоквадратичну похибку залишкової помилки забезпечення бажаного значення метрики HaarPSI. Зазначимо, що ця середньоквадратична похибка суттєво залежить від бажаного значення HaarPSI – чим менше це значення, тим більшою є

середньоквадратична похибка, що пов'язане з особливостями поведінки залежностей метрики від Q. Частково залишкова похибка зумовлена дискретністю значень ПКС Q. У майбутньому доцільно приділити увагу кодерам AVIF та HEIF, які теж використовуються в HEVC, але є менш дослідженими, ніж BPG-кодер.

Список використаних джерел

1. Chandler, D.M. Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy. *J. Electron. Imaging* **2010**, *19*, 011006. URL: <https://doi.org/10.1117/1.3267105> (дата звернення: 03.06.2025).
2. Mielke, C.; Boshce, N.K.; Rogass, C.; Segl, K.; Gauert, C.; Kaufmann, H. Potential Applications of the Sentinel-2 Multispectral Sensor and the ENMAP hyperspectral Sensor in Mineral Exploration. *EARSel eProc.* **2014**, *13*, 93–102. URL: <https://doi.org/10.12760/01-2014-2-07> (дата звернення: 07.06.2025).
3. Blau Y. Rethinking lossy compression: The rate-distortion-perception tradeoff / Y. Blau, T. Michaeli // International Conference on Machine Learning (PMLR). – 2019. – P. 675–685.
4. Makarichev V., Lukin V., Brysina I., On the Impact of Discrete Atomic Compression on Image Classification by Convolutional Neural Networks, *Computation*, 12(9), August 2024, DOI: [10.3390/computation12090176](https://doi.org/10.3390/computation12090176) (дата звернення: 09.06.2025)
5. Chen, Y.; Mukherjee, D.; Han, J.; Grange, A.; Xu, Y.; Parker, S.; Chen, C.; Su, H.; Joshi, U.; Chiang, C.-H.; et al. An Overview of Coding Tools in AV1: The First Video Codec from the Alliance for Open Media. *SIP* **2020**, *9*, e6. URL: <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2020.2> (дата звернення: 07.06.2025).
6. Kryvenko, S.; Lukin, V.; Vozel, B. Lossy Compression of Single-channel Noisy Images by Modern Coders. *Remote Sensing*, **2024**, *16*, 2024. URL <https://doi.org/10.3390/rs16122093> (дата звернення: 11.06.2025)
7. Li, F.; Ieremeiev, O.; Lukin, V.; Egiazarian, K. BPG-Based Lossy Compression of Three-Channel Remote Sensing Images with Visual Quality Control. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 2740. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16152740> (дата звернення: 11.06.2025)
8. Reisenhofer, R.; Bosse, S.; Kutyniok, G.; Wiegand, T. A Haar Wavelet-Based Perceptual Similarity Index for Image Quality Assessment. *Signal Process. Image Commun.* **2018**, *61*, 33–43. URL: <https://doi.org/10.1016/j.image.2017.11.001> (дата звернення: 13.06.2025).
9. Just Noticeable Difference Prediction and Image Quality Assessment /N. Stojanović, B. Bondžulić, B. Pavlović, V. Petrović, O. Zelmati// In 2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). – 2022. – P. 234-238.
10. Intelligent visually lossless compression of dental images / L. Kryvenko, O. Krylova, V. Lukin, S. Kryvenko // *Adv. Opt. Technol.* – 2024. – Vol.13:1306142.
11. Li, F. Two-step providing of desired quality in lossy image compression by SPIHT /F. Li, S. Krivenko, V. Lukin// *Radioelectronic and computer systems.* – 2020. – Vol. 2. – P. 22-32.

**ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖ
ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ КЕРУВАННЯ РОЄМ ДРОНІВ**
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Динамічні процеси при виконанні потрібних дій з використанням дронів мають значний вплив на ефективність виконання цих місій. У сучасних умовах, в яких знаходиться Україна, ведення бойових дій та розвідувальних операцій ключову роль відіграє здатність дронів швидко і точно аналізувати навколишнє середовище, визначати необхідні об'єкти та ухвалювати оптимальні рішення щодо маршруту та цілей атаки. Висока автономність таких систем дозволяє мінімізувати ризики для операторів і підвищити ефективність виконання завдань. Однією з головних проблем при цьому є якість зображень, отриманих із сенсорів дрона, що може значно погіршуватись через вплив шуму, спотворення сигналу під час передачі даних і обмежену роздільну здатність камер. Вплив шумових завад та спотворень, спричинених стисненням з втратами, може значно знижувати ефективність локалізації та класифікації об'єктів, що є критичним для бойових місій [1]. Тому актуальним завданням є розробка моделей нейронних мереж, здатних компенсувати ці недоліки та забезпечувати високу точність розпізнавання та прийняття рішень в умовах реального часу.

Метою дослідження є розробка математичних моделей і алгоритмів, що дозволяють враховувати комплекс впливових факторів у процесі прийняття рішень дронами в режимі реального часу.

Аналіз показав, що вразливість нейронних мереж до атак, шумових спотворень і збоїв у вагових коефіцієнтах значно обмежує їхню функціональність та надійність [2], тому і запропоновані методи підвищення стійкості. Для цього використовується динамічний інференс та оптимізація структури моделі, що дозволяють зменшити обчислювальні витрати та покращити точність роботи алгоритмів в умовах реального часу та робить використання цих технологій важливим для створення автономних платформ.

Для реалізації застосунку плануються використовувати інструментальні засоби: Python (розробка та навчання нейронних мереж), TensorFlow або PyTorch (бібліотеки машинного навчання), OpenCV (обробка зображень), ROS (Robot Operating System) (моделювання та інтеграція з дронами).

Отримані результати дають можливості для використання нейронних мереж та машинного навчання при підвищенні ефективності прийняття рішень керування роями дронів, зменшення впливу низької якості сенсорних даних на прийняття рішень, підвищенні надійності та стійкості системи прийняття рішень, забезпеченні прийняття рішень в реальному часі, створенні технологічної основи для розвитку більш автономних та ефективних систем керування роями дронів

Список використаних джерел.

1. Tsekhmystro, R., Rubel, O., Prysiazhniuk, O., & Lukin, V. (2024). Impact of Distortions in UAV Images on Quality and Accuracy of Object Localization. Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 4(112). DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.05>.
2. Moskalenko, V., Korobov, A., & Moskalenko, Y. (2024). Object Detection with Affordable Robustness for UAV Aerial Imagery: Model and Providing Method. Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 3(111). DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.3>

ВЕБ-ЗАСТОСУНОК ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОСОБИСТИМИ ФІНАНСАМИ
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Проблема ефективного управління особистими фінансами є однією з найактуальніших у сучасному суспільстві. У світі, де економічні процеси стають дедалі складнішими, а фінансові ринки швидко змінюються, звичайному громадянину все важче контролювати власні доходи й витрати без спеціалізованих інструментів. Ситуацію ускладнює і постійне зростання інфляції, коливання валютних курсів, нестабільність ринку праці, а також збільшення доступності різноманітних кредитних продуктів. Ці фактори роблять необхідність свідомого фінансового планування очевидною умовою досягнення фінансової стабільності.

Проте реальний стан фінансової грамотності серед населення залишається невтішним. Згідно з результатами опитування, проведеного Національним банком України, лише третина дорослого населення має базові знання у сфері фінансової грамотності. Більшість людей не ведуть облік своїх витрат, не планують бюджети й не мають заощаджень. Низький рівень фінансової грамотності веде до непередбаченого витрачання ресурсів, накопичення боргів і загострює проблему фінансової незахищеності значної частини громадян.

Однією з основних причин цього є відсутність зручних, зрозумілих і доступних інструментів для контролю особистих фінансів. І хоча існують численні мобільні застосунки та веб-сервіси для обліку витрат, значна їх частина не адаптована до специфіки української економіки: вони не враховують особливості гривневої інфраструктури, системи оподаткування, банківських транзакцій, а також культурні аспекти фінансової поведінки.

Додатковою проблемою є складність інтерфейсів багатьох фінансових застосунків, що вимагає від користувача високого рівня підготовки або фінансової освіченості. Для більшості пересічних громадян важливо мати можливість швидко і просто вносити дані про витрати, отримувати зрозумілі графіки й аналітичні звіти без складних налаштувань і зайвих дій.

Отже, нагальною потребою є розробка веб-застосунку нового покоління, який би дозволив кожному користувачу легко і ефективно контролювати особисті фінанси. Такий застосунок має бути адаптований до українського ринку, мати простий і дружній інтерфейс, забезпечувати високу швидкість роботи й надійний захист даних. Це сприятиме підвищенню фінансової грамотності населення, зниженню рівня боргового навантаження та загальному підвищенню економічної стабільності суспільства.

Метою дослідження є розробка веб-застосунку для автоматизації обліку особистих фінансів користувача з метою підвищення ефективності фінансового планування.

Для розробки веб-застосунку були використані: технології REST API та AJAX, бібліотека Chart.js для візуалізації, механізми безпеки сесій і SQL-запитів, інструменти тестування Postman [1] і Jmeter [2].

В результаті роботи було створено веб-застосунок FinEasy із модулями реєстрації та входу (з 2FA), обліку доходів і витрат, дашбордом із інтерактивними графіками, фільтрами транзакцій та налаштуваннями користувача, стійкістю до помилок і відповідністю критеріям прийнятності. Система готова до впровадження та подальшого розширення функціоналу.

Список використаних джерел.

1. Postman. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.postman.com/>
2. Apache JMeter. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://jmeter.apache.org/>

ВЕБ-ЗАСТОСУНОК СИСТЕМИ ДЛЯ ПРИВАТНОГО ВИДАВНИЦТВА
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Підтримка і розвиток читання є неможливими без розвитку книжкової екосистеми України, її розбудова та підтримка є одним із пріоритетних завдань Стратегії розвитку читання на період до 2032 року «Читання як життєва стратегія» та операційного плану її реалізації у 2023-2025 роках, затвердженими Кабінетом Міністрів України 03 березня 2023 року.

У сучасних умовах цифровізації ключовим фактором успішності малого та середнього бізнесу, зокрема приватних видавництв, є впровадження ефективних інформаційних систем для автоматизації внутрішніх процесів [1].

Приватні видавництва часто стикаються з проблемами організації замовлень, керування авторськими правами, обробки матеріалів, взаємодії з клієнтами та розповсюдженням продукції. У той же час, більшість готових рішень є занадто дорогими або не відповідають специфічним потребам невеликих видавничих організацій [2,3].

Метою дослідження є розробка веб-застосунку для підтримки основних бізнес-процесів приватного видавництва, що забезпечує зручну взаємодію між працівниками, клієнтами та авторами.

Розробка веб-застосунку, адаптованого під конкретні потреби приватного видавництва, дозволяє не лише підвищити продуктивність праці, а й забезпечити ефективний облік, контроль та аналіз бізнес-процесів. Таким чином, розробка такого застосунку є актуальним завданням, що має практичну цінність і сприяє цифровій трансформації видавничої справи.

Для розробки веб-застосунку системи для приватного видавництва були використані: ASP.NET MVC, MS SQL Server, Entity Framework.

В результаті роботи було розроблено веб-застосунок для підтримки основних бізнес-процесів приватного видавництва, що забезпечує зручну взаємодію між працівниками, клієнтами та авторами, а також дозволяє автоматизувати обробку замовлень, облік видань і контроль за виконанням робіт.

Список використаних джерел

1. Šprem Š, Tomažin N, Matečić J, Horvat M. (2024). Building Advanced Web Applications Using Data Ingestion and Data Processing Tools. *Electronics*. 13(4):709. <https://doi.org/10.3390/electronics13040709>
2. Abu Sara, Mutaz & Abuseeni, Ahmad. (2019). A Web Development System for Producing an Interactive Electronic Book. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 8. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/3381.12019>.
3. Yong-Fei, L., Zhen-Guo, C. (2013). Design and Implement of News Publishing System Based on MVC Design Pattern. In: Yang, G. (eds) *Proceedings of the 2012 International Conference on Communication, Electronics and Automation Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 181. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31698-2_106.

РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ОБЛІКУ МЕДИЧНИХ ОГЛЯДІВ СПІВРОБІТНИКІВ ПІДПРИЄМСТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасних ринкових умовах, коли конкуренція постійно зростає, контроль рівня здоров'я співробітників стає одним з ключових елементів ефективної роботи. Важливим механізмом контролю здоров'я співробітників є планові та позапланові медичні огляди [1].

Впровадження планових та позапланових медичних оглядів дозволяє компаніям підтримувати високі стандарти праці, дотримуватися вимог законодавства та підвищувати продуктивність праці. Крім того, вони сприяють скороченню кількості та термінів лікарняних листів працівників, а також сприяють профілактиці важких та хронічних захворювань [2].

Метою доповіді є автоматизація процесів обліку планових та позапланових медичних оглядів співробітників.

Основні функції розробленої системи обліку:

- ведення реєстру працівників;
- контроль термінів дії планових медичних оглядів;
- контроль термінів дії позапланових медичних оглядів;
- нагадування про необхідність проходження медичних оглядів;
- формування направлень до медичних установ на проходження медичних оглядів;
- формування звітів для керівництва та регуляторів;
- формування електронних розсилок співробітникам.

Особливу важливість проходження медичних оглядів має в галузях із підвищеними вимогами до здоров'я співробітників: гірничо-видобувних підприємствах, важкому виробництві, підприємствах зі складними умовами праці тощо.

Система представлена у вигляді веб-застосунку з використанням сучасних технологій, що забезпечує швидкий та якісний доступ до необхідної інформації з будь-якого пристрою, в тому числі мобільного, звідусіль у світі. Також суттєва увага приділена захисту особистих даних співробітників – створено підсистему управління доступом до них. При реєстрації співробітника йому присвоюється унікальний ідентифікатор, який дозволяє уникнути витоку конфіденційної інформації та особливо ідентифікації медичних даних до прізвищ та імен співробітників. Тестова експлуатація продемонструвала високу ефективність розробленого застосунку.

Список використаних джерел

1. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.2007 № 246 «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій» [Наказ МОЗ України] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0846-07#Text>. Дата звернення: 07.07.2025.

2. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 23.07.2002 № 280 «Щодо організації проведення обов'язкових профілактичних медичних оглядів працівників окремих професій, виробництв і організацій, діяльність яких пов'язана з обслуговуванням населення і може призвести до поширення інфекційних хвороб» [Наказ МОЗ України] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0639-02#Text>. Дата звернення: 07.07.2025.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ UX/UI-ДАНИХ МАСОВИХ ОПИТУВАНЬ КОРИСТУВАЧІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У цифровому середовищі UX/UI-дизайн визначає не лише вигляд, а й ефективність взаємодії з сервісами, безпосередньо впливаючи на залучення та утримання користувачів. UX-дослідження є одним з ключових інструментів для ухвалення дизайнерських і продуктових рішень. Водночас обсяги та частота таких досліджень створює складності з обробкою даних. Для команд без аналітичної підтримки це ускладнює регулярний аналіз. Виникає потреба в технологічному підході, здатному автоматизувати обробку і підтримувати прийняття рішень. В цьому напрямку наукова проблема полягає у відсутності універсальної моделі аналізу, а практична — у складності їх використання для прогнозування та персоналізації. Це обґрунтовує доцільність досліджень, що поєднують UX-аналітику з машинним навчанням.

У сучасній науковій літературі спостерігається стійкий інтерес до інтеграції UX-досліджень у процес дизайн, поєднуючи їх з алгоритмами машинного навчання. Дослідження Zhang, Chen та Huang показали, що навіть обмежені UX-дані придатні для побудови моделей поведінки в дизайнерських середовищах. [1] Zender, Humm та Holzheuser довели, що адаптивні інтерфейси, побудовані на основі користувацьких шаблонів поведінки, підвищують довіру до систем та ефективність взаємодії. [2] Вони також запропонували застосування пояснюваного ШІ (XAI) для UX-оцінювання, що сприяє прозорості рішень. Duan, Chen та Li застосували методи комп'ютерного зору для автоматичного виявлення елементів інтерфейсу у відеоаналізі [3], а Šejka, Smutný, Vondrák та колеги — YOLOv7 для побудови динамічних теплових карт [4].

Водночас у публікації Batch, Ji та Fan наголошується на потребі у простіших інструментах аналізу UX-даних [5]. Запропонована ними система uxSense поєднує елементи комп'ютерного зору, обробку природної мови та базову класифікацію UX-метрик. Огляд у журналі Human-Centric Intelligent Systems підсумовує сучасні підходи до застосування нейромереж в UX-аналітиці, зокрема мультимодальні системи, і водночас акцентує на недостатній увазі до низки UX/UI-даних. [6] Наприклад, до табличних даних з опитувань — простого, але найбільш поширеного формату. У попередній роботі авторів було запропоновано архітектуру системи, здатної обробляти різні типи UX-даних у межах єдиної аналітичної моделі [7]. Поточне дослідження стало логічним продовженням цієї концепції та сфокусувалося на класифікації формалізованих UX/UI-даних з опитувань.

Попри зростання інтересу до нейромереж в UX/UI-аналітиці, більшість досліджень зосереджена більшою мірою на складних мультимодальних даних, тоді як прості формалізовані анкети — основне джерело для малих команд і стартапів — залишаються малодослідженими. Їх обробку ускладнює нерівномірна структура, пропущені значення та змішані типи ознак. Ця робота спрямована на перевірку ефективності моделей машинного навчання в задачах класифікації на основі таких даних, щоб оцінити їхню придатність для побудови UX-аналітичних рішень. Мета дослідження полягає в оцінці ефективності моделей машинного навчання для аналізу даних масових опитувань користувачів освітньої платформи, з фокусом на прогнозування збереження платного тарифу за соціально-демографічними, мотиваційними та функціональними ознаками. У межах роботи було підготовлено дані, проведено кореляційний і кластерний аналіз, визначено цільову змінну та побудовано кілька моделей із подальшим порівнянням їх точності, щоб перевірити можливість їхнього використання в умовах малих вибірок.

Дослідження було зосереджено на аналізі опитування користувачів української освітньої системи CASES [8], що є онлайн-платформою для навчання та роботи в креативних індустріях. Участь взяли понад 170 респондентів, які заповнили анкету про навчання, підписку, інтерес до функцій платформи та соціально-поведінкові характеристики. Зібрані 22 ознаки охоплювали числові, категоріальні, мультивибіркові та бінарні змінні, які були закодовані та нормалізовані для машинного аналізу. Після обробки набір розширився до 47 ознак.

Дослідницький аналіз включав кореляційні методи та коефіцієнт Крамера для виявлення залежностей між змінними, а також кластеризацію KMeans, що дозволила виокремити два сегменти користувачів — залучених та ознайомих. На основі матриці, зображеної на рисунку 1, було виявлено кілька суттєвих залежностей: зокрема, між частотою навчання та типом обраних курсів, архетипом та роллю користувача на платформі, а також між форматом зайнятості та участю у фріланс-проектах.

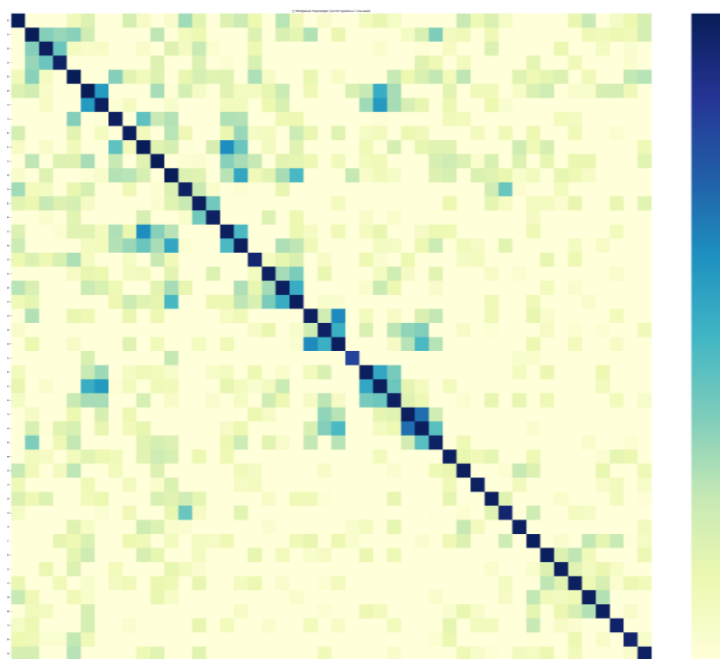


Рис. 1. Матриця Крамера для категоріальних ознак

Для прогнозування активної підписки застосовано п'ять моделей машинного навчання: Decision Tree, Random Forest, XGBoost, MLP і kNN. Найкращі результати показали MLP (точність 0.85) і ансамблеві моделі (0.82). Для їх порівняння було сформовано консолідовану таблицю результатів, представлену нижче як таблицю 1, яка містить основні показники кожного алгоритму.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця метрик моделей

Модель	Метрики			
	Accuracy	Precision (avg)	Recall (avg)	F1-score (avg)
Decision Tree	0.61	0.61	0.61	0.6
Random Forest	0.82	0.83	0.81	0.81
XGBoost	0.82	0.81	0.8	0.8
MLP	0.85	0.83	0.82	0.82
kNN	0.61	0.62	0.6	0.59

Найбільш впливовими факторами стали досвід підписки, частота взаємодії, дохід та освітні інструменти. Моделі не лише забезпечили точне передбачення, а й дозволили сформувати поведінкові профілі, що можна використати для персоналізованої аналітики. Дослідження підтвердило, що UX/UI-дані з масових опитувань можуть бути ефективно використані для побудови моделей машинного навчання, навіть за умови обмеженої вибірки. Результати демонструють доцільність використання такого підходу навіть в сервісах з обмеженими ресурсами. Інтеграція моделі в систему UX-аналітики може забезпечити масштабованість і підтримку персоналізованих рішень. Рекомендується застосовувати цей підхід для моніторингу поведінки користувачів і адаптації функціоналу, а також розширити дослідження на повторні заміри та різні типи UX/UI-даних.

Список використаних джерел

1. Zhang Z., Chen H., Huang R., Zhu L., Ma S., Leifer L., Liu W. Automated Classification of User Needs for Beginner User Experience Designers: A Kano Model and Text Analysis Approach Using Deep Learning. *Information*, 2024. Vol. 5(1). <https://www.mdpi.com/2673-2688/5/1/18>
2. Zender A., Humm B.G., Holzheuser A. Successfully Improving the User Experience of an Artificial Intelligence System. 19th Conf. on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS). October 2024. DOI: 10.15439/2024F2707. <https://www.researchgate.net/publication/385197079>
3. Duan P., Chen C.-Y., Li G., Hartmann B., Li Y. UICrit: Enhancing Automated Design Evaluation with a UI Critique Dataset. *Proceedings of the 2024 CHI Conference*. ACM, 2024. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3654777.3676381>
4. Čejka M., Masner J., Jarolímek J., Šimek P. UX and Machine Learning – Preprocessing of Audiovisual Data Using Computer Vision to Recognize UI Elements. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*. 2023. Vol. 15(3). P. 35–44. DOI: 10.7160/aol.2023.150304
5. Batch A., Ji Y., Fan M., Zhao J., Elmqvist N. uxSense: Supporting User Experience Analysis with Visualization and Computer Vision. *IEEE Access*. 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10034833>
6. Fan M., Yang X., Yu T.T., Liao Q.V., Zhao J. Human-AI Collaboration for UX Evaluation: Effects of Explanations and Synchronization. *arXiv preprint*, 2021. arXiv:2112.12387. <https://arxiv.org/pdf/2112.12387>
7. Ігнатюк Є. О., Попов А. В. МЕТОДИКО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ UX-ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. *Сучасні інформаційні системи*. 2024. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/download/3678/3017>
8. Соцмережа та EdTech для креативних індустрій. CASES. URL: <https://cases.media/>

РОЗРОБКА TELEGRAM-БОТУ ДЛЯ ВЕЛОКВЕСТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному світі цифрові технології відіграють важливу роль у розвитку активного дозвілля. Вони не лише спрощують організаційні процеси, а й створюють нові можливості для інтерактивної взаємодії. Одним із популярних форматів заходів, що поєднують спорт, логіку та командну роботу, є велоквести. Такі ігри сприяють активному способу життя, розвитку навичок орієнтування та взаємодії в команді [1, 2].

Проте організація велоквестів має низку викликів. Зокрема, необхідно рівномірно розподіляти учасників між локаціями, контролювати проходження маршрутів, фіксувати досягнення чекпойнтів та вести статистику. Традиційні методи, як-от паперові картки чи ручний підрахунок результатів, є застарілими та можуть спричиняти помилки або плутанину. Тому використання автоматизованих рішень, таких як Telegram-боти, значно підвищує ефективність і зручність проведення заходів.

Метою роботи автоматизація організації велоквестів, включаючи контроль маршруту, відстеження прогресу та збір аналітики. Розробка охоплює повний цикл функціонування системи та підтверджує працездатність запропонованої моделі.

Після підтвердження участі користувач отримує повідомлення з першою локацією, яка є початковим етапом маршруту. Користувач може самостійно прибути на локацію, після чого необхідно відсканувати QR-код, розміщений у відповідному місці.

Бот автоматично розпізнає QR-код, перевіряє його коректність, фіксує прогрес і надсилає наступну локацію [3]. У разі введення або сканування неправильного коду, бот миттєво інформує про помилку і запрошує повторити спробу.

У разі виникнення проблем (наприклад, втрата зв'язку, пошкоджений QR-код, труднощі з навігацією) користувач має змогу звернутися за допомогою безпосередньо через бот. Надіслане повідомлення одразу пересилається адміністратору, який може оперативно відповісти або втрутитися в ситуацію. Такий канал зв'язку дозволяє уникнути затримок і сприяє ефективному управлінню квестом.

Після проходження всіх етапів маршруту користувач автоматично отримує фінальне повідомлення з підсумковою інформацією. Бот надсилає статистику, що включає тривалість участі, загальну відстань маршруту, кількість пройдених локацій, а також середню швидкість пересування. Це дозволяє учаснику оцінити власні результати і порівняти їх з іншими.

Проведене тестування Telegram-бота підтвердило стабільну роботу всіх функціональних компонентів системи. Усі основні сценарії використання – реєстрація користувача, створення та проходження квесту, а також обробка й збереження геолокаційної інформації – виконуються без збоїв. Дані, що генеруються під час проходження, зберігаються в базі даних коректно та в повному обсязі. Отримані результати дозволяють зробити висновок про готовність системи до використання в реальному середовищі. Приклад проходження і закінчення квесту, отримання статистики і результатів учасниками показано на рисунку 1.

У результаті виконання роботи було розроблено Telegram-бот для автоматизації організації велоквестів у молодіжному хабі «КОМОРА». Проєкт дозволив вирішити низку актуальних проблем, зокрема забезпечити рівномірний розподіл учасників між локаціями, відстежувати їхнє переміщення за допомогою GPS, реєструвати проходження чекпойнтів через QR-коди та формувати детальну статистику після завершення квесту. Візуалізація маршруту та підрахунок подоланої відстані додають змагального елементу, підвищуючи інтерес до заходу. Проєкт є актуальним і перспективним для розвитку активного дозвілля,

оскільки поєднує фізичну активність із сучасними технологіями, роблячи велоквести більш інтерактивними та організованими. Telegram-бот, впроваджений у хабі «КОМОРА», продемонстрував свої переваги в реальних умовах і може бути адаптований для використання в інших організаціях та заходах подібного формату.

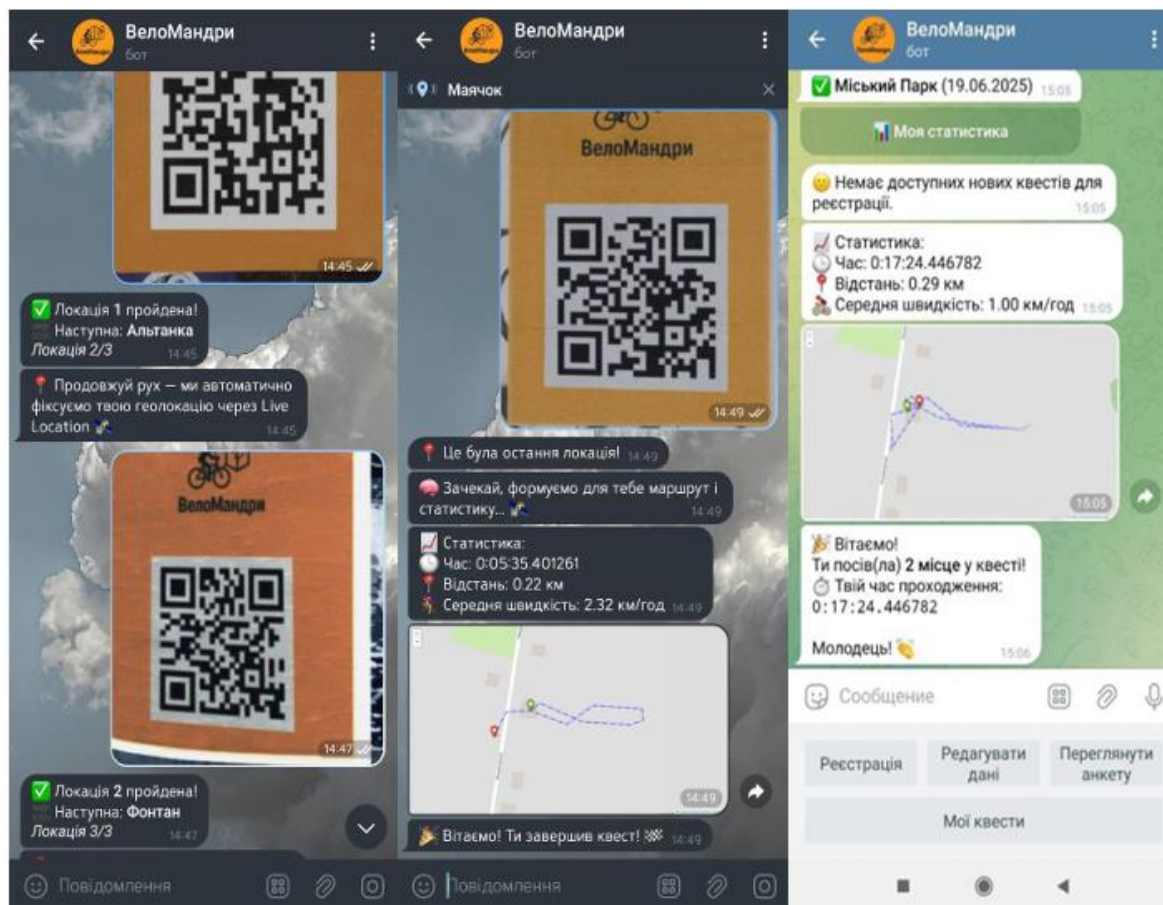


Рис. 1. Проходження квесту за допомогою Telegram-бота

Подальший розвиток проєкту може включати розширення функціоналу, зокрема інтеграцію з картографічними сервісами для точнішої побудови маршрутів, можливість командної гри, додаткові аналітичні інструменти та персоналізовані рекомендації для учасників. Таким чином, розробка Telegram-бота досягла поставленої мети, надавши ефективне рішення для автоматизації велоквестів та сприяючи їх популяризації серед молоді.

Науковий керівник: к.т.н., доцент Яшина О.С.

Список використаних джерел

1. Велоквест: що це таке і як його організувати [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.veloonline.com/uk/articles.shtml?id=51>
2. Велосхід: як велосипед може розвивати громадянське суспільство [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mistosite.org.ua/articles/veloskhid-ia-k-velosyped-mozhe-rozvyvaty-hromadianske-suspilstvo>
3. Sethy, S., & Dadhich, M. Adoption of QR Code Technology for Easy Access to Library and Management Information Services [Текст] / S. Sethy, M. Dadhich. – Sir Padampat Singhania University, Udaipur. – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=15337&context=libphilp>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ КОРИСТУВАЧІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ SAAS-СИСТЕМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В сучасному світі модель Software-as-a-Service набуває все більшого поширення. З 2020 року близько 80% компаній вже використовували у своїй роботі принаймні один хмарний сервіс, а сьогодні цей показник ймовірно може бути ще вищим. Адже ринок хмарних рішень вже багато років демонструє стійке зростання. Особливий вплив став відчуватися після пандемії. Аналітики прогнозують, що найближчими роками глобальний ринок SaaS буде мати значний стрибок, частково обумовлений зростаючим попитом на хмарні програми, недавнім асортиментом мобільних пристроїв і зростаючим попитом на інформативні дані [1].

Інформаційні SaaS-системи, останнім часом, активно використовуються у різних сферах бізнесу, освіти та адміністрування [2]. Для покращення їх ефективності важливо розуміти поведінкові закономірності користувачів, що дозволяє оптимізувати інтерфейс, підвищити конверсію та запобігти відтоку клієнтів.

Метою дослідження є розробка моделей та методів для аналізу поведінки користувачів SaaS-систем на основі даних про їх активність та взаємодію з сервісами.

В роботі був проведений аналіз існуючих моделей та методів дослідження поведінки користувачів SaaS систем. Він включає вивчення сучасних підходів до моделювання поведінки користувачів та оцінку ефективності різних методів збору та аналізу даних.

При виконанні досліджень були використані методи машинного навчання, нейромережеві алгоритми, кластерний аналіз та когортний аналіз для сегментації користувачів і виявлення закономірностей у їх поведінці [3,4].

В результаті були розроблені моделі та методи, які дозволяють аналізувати поведінку користувачів SaaS-систем у реальному часі, прогнозувати їх дії та надавати рекомендації для покращення взаємодії. В дослідженні були виявлені ключові фактори, що впливають на відтік користувачів, а також оптимальні стратегії персоналізації сервісів.

Використання запропонованих у дослідженні моделей та методів сприяє підвищенню ефективності SaaS-систем, зниженню витрат з утримання клієнтів та покращенню загальної якості користувацького досвіду.

Список використаних джерел.

1. Ринок хмарних технологій 2023–2028: виклики та тенденції [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://dev.ua/news/rynok-khmarnykh-tekhnologii>.
2. Michon, R. (2017). The Complete Guide to Software as a Service: Everything You Need to Know About SaaS, 230 p.
3. Serra-Burriel, M., Ames, C. (2022). Machine Learning-Based Clustering Analysis: Foundational Concepts, Methods, and Applications. In: Staartjes, V.E., Regli, L., Serra, C. (eds) Machine Learning in Clinical Neuroscience. Acta Neurochirurgica Supplement, vol 134. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85292-4_12.
4. Dawei Jiang, Qingchao Cai, Gang Chen, Jagadish, H. V., Beng Chin Ooi, Kian-Lee Tan, Anthony K. H. Tung Cohort Query Processing. Proceedings of the VLDB Endowment, vol. 10, No. 1, October 2016 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.vldb.org/pvldb/vol10/p1-ooi.pdf>.

ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сільське господарство – одна з найперспективніших галузей економіки, що розвивається дуже швидко та різниться впровадженням нових технологій. Використання супутникових знімків вже стало звичним явищем у плануванні врожаю, а нові системи зрошення забезпечують постійний рівень вологи на полях сільськогосподарських культур. Останнім часом, використання дронів у сільському господарстві стає все більш поширене – їх застосовують у багатьох аспектах вирощування сільськогосподарських культур, розведення худоби або моніторингу полів [1]. Зміни клімату, зростання витрат на ресурси, необхідність підвищення продуктивності та інші чинники вимагають впровадження новітніх технологій в аграрному секторі. Одним із перспективних напрямів є використання рою дронів, а саме множин автономних безпілотних літальних апаратів, які здатні до координації дій у режимі реального часу. В умовах цифровізації сільського господарства дана технологія дає змогу виконувати широкий спектр агровиробничих задач з мінімальним людським втручанням [2].

Метою дослідження є створення інтелектуальної моделі керування роєм дронів для виконання операцій з моніторингу, обприскування, картографування та аналізу стану сільськогосподарських угідь.

Проведено аналіз основних сценаріїв застосування рою дронів у сільському господарстві: моніторинг полів; побудова NDVI-карт; виявлення зон посухи, хвороб та шкідників; точкове обприскування засобами захисту рослин; координація з наземними автономними системами в рамках інтегрованих платформ. У доповіді представлено децентралізовану архітектуру рою з використанням мультиагентного підходу, яка дозволяє кожному дрону автономно приймати рішення, синхронізуючи дії з іншими агентами через локальні канали зв'язку. Модель дозволяє забезпечити стійкість до втрати окремих елементів і гнучке масштабування системи. Було проведено моделювання маршрутизації дронів із використанням алгоритмів роїння.

Під час роботи були використані: алгоритми роїння, машинне навчання, мультиагентне моделювання, методи кластеризації та маршрутизації.

Використання рою дронів у сільському господарстві дозволяє підвищити ефективність агровиробництва, знизити витрати добрив та пестицидів, оптимізувати агротехнічні заходи й забезпечити екологічно стійкий розвиток галузі.

Список використаних джерел.

1. Діордієв, В. Т. Проблеми використання дронів у задачах обприскування сільськогосподарських культур та шляхи їх вирішення / В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов, О.С. Семендяєв / Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 2019, т. 9, № 1., <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-45>.
2. Cheraghi, A.R., Shahzad, S., Graffi, K. (2022). Past, Present, and Future of Swarm Robotics. In: Arai, K. (eds) Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 296. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82199-9_13.
3. Tsouros, D.C.; Bibi, S.; Sarigiannidis, P.G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. Information 2019, 10, 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>.

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ INTERSYSTEMS IRIS DATA PLATFORM ДЛЯ ПОБУДОВИ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ВЕБДОДАТКА ІВЕНТ ПОСЛУГ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Проведення ділового чи приватного івенту пов'язане з великими трудовитратами, оскільки є відповідальним завданням великої кількості спеціалістів, а успіх його вирішення залежить від професіоналізму та досвіду організатора. До кожного івенту має бути забезпечений індивідуальний підхід, з відповідною увагою до всіх дрібниць передбачуваного заходу. Оцінка ефективності проведеного івенту дає можливість зрозуміти, наскільки вкладені кошти окупилися, і наскільки результати відповідають поставленим цілям.

Проведення івенту може включати наступні роботи: розробка креативної концепції заходу (або використати аналог); підбір та бронювання майданчика для проведення заходу; запрошення гостей заходу; організаційна логістика – забезпечення транспорту, доставки всіх матеріалів та персоналу на майданчик заходу; організація харчування; підбір артистів та розважальних номерів; декорування приміщень заходу; технічне забезпечення заходу – світло, звук; виробництво брендованої продукції; підбір та тренінг промо-персоналу для заходу; адміністрація та проведення заходів; підготовка фото та відео-звітів, тощо. Кожна з вказаних робіт має свій сценарій, безпосередніх виконавців, обладнання, матеріали, фірми підрядники, тощо, які потрібно мати в достатній кількості для проведення замовленого івенту. В зв'язку з цим виникає задача по розробці вебдодатка для організації та проведення івент послуг будь-якого ділового чи приватного заходу.

Метою доповіді є дослідження технологій платформи **InterSystems IRIS Data Platform®** для розробки вебдодатка послуг з використанням багатовимірних БД та сховищ інформації. В доповіді наводяться результати моделювання предметної області та аналіз особливостей використаних технологій. Розроблений вебдодаток використовує СКБД, що дозволяє обслуговувати тисячі конкуруючих користувачів та оперує терабайтами даних. Дані можуть бути представлені як таблиці, об'єкти чи багатовимірні масиви. Доступ до даних здійснюється з будь-якої моделі без будь-яких труднощів, при цьому не потрібне перетворення даних між моделями, що найчастіше знижує продуктивність. Для доступу до даних можна одночасно використовувати всі три способи. Мова маніпулювання даними – Cache Object Script, SQL із вбудованими засобами обробки багатомірних кубів. Високопродуктивна платформа **InterSystems IRIS Data Platform®** містить усі необхідні інструменти та можливості для швидкої розробки транзакційних, аналітичних та транзакційно-аналітичних додатків [1], які скорочують затримки під час підготовки даних для аналізу та дозволяють отримувати інформацію дійсно в оперативному режимі. Реалізація на платформі масштабується як горизонтально, так і вертикально, що дозволяє їй ефективно справлятися з зростаючими робочими навантаженнями, великими обсягами даних та паралельними запитами. Використання технологій поєднує найкращі інструменти та технології аналізу даних, бізнес-аналітики та прогнозування і дозволяє отримати ефективні аналітичні процеси. Завдяки аналітичним можливостям вебдодаток дозволяє в реальному часі отримувати корисну інформацію та використовувати її для ухвалення оперативних рішень.

Список використаних джерел.

1. Лещенко, О. Б. Застосування технології DeepSee InterSystems для побудови багатовимірних баз даних і сховищ інформації [Текст] / О. Б. Лещенко, Ю. О. Лещенко. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", 2021. – 66 с.

РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КАРДІОЛОГІЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ ЛІКАРНІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

В сучасних умовах розвитку цифрових технологій важливим завданням є підвищення ефективності надання медичних послуг шляхом впровадження інформаційних систем у закладах охорони здоров'я. Особливо це стосується кардіологічних відділень (стаціонарів) лікарень, де постійний моніторинг показників артеріального тиску та проведення обстежень серцево-судинної системи має вирішальне значення для своєчасної діагностики, уникнення критичних станів пацієнтів та їх лікування. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), ішемічна хвороба серця та інсульт залишаються основними причинами смертності у світі, що підтверджує критичну потребу в автоматизованих рішеннях для збору й аналізу медичних даних [1].

В уніфікованому клінічному протоколі первинної та спеціалізованої медичної допомоги за 2024 рік вказано, що: «Гіпертонічна хвороба (артеріальна гіпертензія – АГ) є найпоширенішим неінфекційним захворюванням на глобальному рівні та в Україні зокрема. За даними ВООЗ, що ґрунтуються на результатах масштабного епідеміологічного дослідження STEPS (2019), в Україні стандартизований за віком показник поширеності АГ серед дорослих віком 30–79 років становить 43%. В абсолютних цифрах це становить близько 13,2 млн дорослих з АГ у зазначеному віковому діапазоні. Практично половина пацієнтів з АГ (49%) отримують антигіпертензивну терапію, але лише 14% мають контрольований артеріальний тиск (АТ) < 140/90 мм рт. ст. Вкрай низький показник ефективності контролю АТ у популяції є ключовим чинником серцево-судинних захворювань та смерті, за яким Україна віднесена до категорії країн з дуже високим серцево-судинним ризиком. У 2019 році кількість смертей від серцево-судинних захворювань сягнула 383 000, і 53% з них були віднесені на рахунок АГ [2]. Артеріальна гіпертензія є одним із факторів ризику розвитку серцево-судинних захворювань і смертності, спричиненої ними. Своєчасна діагностика та ефективна терапія можуть суттєво знизити ймовірність виникнення інсульту, інфаркту міокарда та серцево-судинної смертності [2].

Обробка медичних даних у кардіологічних відділеннях стаціонарів стикається з низкою системних проблем, що ускладнюють ефективну діагностику та лікування пацієнтів. Однією з ключових перешкод є фрагментація даних: інформація про вимірювання артеріального тиску, анамнез, данні аналізів, обстежень і призначень часто зберігається в різних джерелах, таких як паперові журнали, медичні карти і частково в медичних інформаційних системах (МІС). Це призводить до затримок у доступі до даних, підвищує ризик помилок та ускладнює аналіз стану пацієнта. Важливі розрахункові показники АТ та розрахункові дані аналізів та обстежень доводиться розраховувати вручну, що займає час і збільшує ймовірність помилок. До того ж, через нестачу інтеграції між системами та паперовими носіями медперсонал може витрачати багато часу на пошук і звірку інформації.

Без інформаційної системи (ІС), яка б об'єднувала дані та надавала аналітичні інструменти, такі як, наприклад, графіки динаміки АТ, графіки впливу ліків на стан пацієнта, історичні дані чи автоматичні підказки, лікарі змушені покладатися на власний досвід і ручні розрахунки, що знижує швидкість і точність прийняття рішень, тим більше, якщо це стосується лікарів, які заступають на чергування, і не можуть мати одразу всі дані і знати поточний стан всіх пацієнтів стаціонару.

Для вирішення проблем обробки медичних даних у кардіологічних відділеннях стаціонарів необхідно впровадити ІС, яка об'єднує всі історичні і поточні дані від вимірювань

артеріального тиску до анамнезу, даних аналізів, обстежень і призначень. ІС має забезпечити єдине сховище, де всі медичні показники, чергові (для всього відділення) та індивідуальні (лікарем) вимірювання АТ автоматично фіксуються в стандартизованому форматі. Це усуне фрагментацію даних, зменшить час на пошук інформації та знизить ризик помилок, пов'язаних із паперовими журналами чи ручним введенням.

Метою доповіді є дослідження автоматизації процесів обробки медичної інформації в кардіологічних відділеннях стаціонарів з метою створення застосунку настільної інформаційної системи кардіологічного відділення лікарні для автоматизації збору, зберігання, обробки, аналізу, візуалізації медичних даних пацієнтів та підвищення точності діагностики і якості лікування.

В доповіді наводяться результати детального аналізу предметної області – в сучасній медичній сфері існує потреба в інформаційній системі, яка об'єднує медичні дані та надає аналітичні інструменти. Було зроблено аналіз і порівняння доступних медичних інформаційних систем, що забезпечують роботу з медичними даними пацієнтів, визначено триланкову клієнт-серверну архітектуру для розробки застосунку, архітектуру модулів системи, спроектовано і реалізовано модулі для роботи з персоналом, пацієнтами, результатами вимірювань, даними аналізів і обстежень. Спроектовано та розроблено реляційну структуру бази даних для реалізації в СУБД Microsoft SQL Server. Для створення настільного застосунку використано: 1) мову програмування C# для реалізації всієї бізнес-логіки та взаємодії з базою даних [3]; 2) платформу Windows Forms для створення графічного інтерфейсу користувача, адаптованого під потреби всіх ланок медичного персоналу клініки (відділення) і реалізації модульної структури застосунку, де кожна форма відповідає окремому функціональному модулю системи; 3) ORM-фреймворк Entity Framework для зручної роботи з базою даних на основі об'єктно-реляційного підходу, з підтримкою LINQ-запитів та автоматичним відображенням змін у сутностях [4]; 4) механізм авторизації з розмежуванням прав доступу медичного персоналу; 5) інтерактивні компоненти WinForms, для зручного введення, перегляду та фільтрації даних; 6) бібліотеку iTextSharp для формування та експорту медичних даних пацієнта у форматі PDF, включно з результатами обстежень та призначеннями. Завдяки використанню цієї технологічної зв'язки розроблений застосунок є настільним, автономним, без потреби у підключенні до веб-серверів чи сторонніх сервісів, що робить його придатним для використання у локальних медичних закладах без складної інфраструктури. Перспективи розвитку застосунку – додавання таких функцій, як аналітичні звіти, візуалізація даних, інтеграція з іншими медичними програмами, МІС або веб-сервісами, оптимізація продуктивності для роботи з великими обсягами даних.

Список використаних джерел

1. World Health Organization (WHO). The top 10 causes of death – Updated 2024 URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
2. Уніфікований клінічний протокол первинної та спеціалізованої медичної допомоги (УКПМД) «Гіпертонічна хвороба (Артеріальна гіпертензія)» 2024 https://moz.gov.ua/storage/uploads/16883422-f721-4d41-af37-15ea3f753322/dn_1581_12092024_dod.pdf
3. Troelsen A. Pro C# 10 with .NET 6 / Troelsen A., Japikse P – Berkeley CA : Apress, 2022. – 1705 p.
4. Chowdhury K. Mastering Visual Studio 2019: Become proficient in .NET Framework and .NET Core by using advanced coding techniques in Visual Studio, 2nd edition – Packt Publishing, 2019. – 374 p.

ЗАСТОСУНОК СИМУЛЯЦІЇ VOIDS ШТУЧНОГО ЖИТТЯ ЗГРАЇ ТВАРИН
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному світі симуляція колективної поведінки є важливим інструментом для вирішення широкого спектра задач у різних галузях, таких як ігрова індустрія, наукові дослідження, розробка безпілотних систем, моделювання натовпу та навчальні симуляції. Моделювання поведінки зграї має широке практичне застосування, починаючи з наукових досліджень та закінчуючи індустрією розваг. В наукових дослідженнях воно використовується для аналізу поведінки тварин, вивчення біологічних систем та дослідження принципів самоорганізації живих істот. В індустрії розваг подібне моделювання може використовуватись під час створення ефектів у кіно, або для ігрової індустрії, де реалістична поведінка тварин буде забезпечувати більш захоплюючий ігровий досвід. Враховуючи швидке розвинення ігрової індустрії у віртуальному просторі, де занурення гравця сильно впливає на ігровий досвід, подібні методи моделювання поведінки зграї будуть використовуватись все ширше.

Алгоритм Boids[1], запропонований Крейгом Рейнольдсом, є одним із найефективніших підходів для моделювання зграєвої поведінки тварин. Однак, із часом виникла потреба у вдосконаленні алгоритму для більш реалістичного відображення взаємодії агентів, уникнення перешкод та адаптації до складних умов. Модернізація алгоритму дала змогу розширити його застосування за межі простої симуляції тваринних зграй, адаптуючи його до складніших умов, таких як автоматичного програмування багатоканальних інтернет-радіостанцій, моделювання соціальних систем або поведінки рою дронів у реальних проектах.

Розробка застосунку симуляції Boids штучного життя зграї тварин ґрунтується на використанні наступних інформаційних технологій: ігровий рушій Unity Engine [2], мова програмування C# [3], мова програмування шейдерів HLSL [4], та алгоритм Boids [1].

Розроблений застосунок є повноцінною програмною системою, яка включає: можливість створення середовища з перешкодами, динамічну зміну параметрів симуляції в реальному часі, а також панель керування для налаштувань. У ході тестування було перевірено працездатність усіх компонентів, продуктивність при збільшенні кількості агентів та стабільність при зміні умов середовища. Застосунок продемонстрував відповідність поставленим вимогам і є зручним інструментом для візуального аналізу колективної поведінки.

Список використаних джерел

1. Boids [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.red3d.com/cwr/boids>
2. Unity Documentation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.unity3d.com>.
3. C# Documentation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/>
4. Compute Shaders in Unity [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://catlikecoding.com/unity/tutorials/rendering/part-1/>

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu
Лещенко Ю.О., к.т.н., доцент
j.leshchenko@khai.edu
Пісклова Т.С., м.н.с.
kafius@ukr.net

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ АТАК РОЮ УДАРНИХ ДРОНІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вдосконалення противником системи захисту цілей призвело до необхідності проведення масованих атак, з використанням хвиль рою ударних дронів. Тому, актуальна тема проведеного дослідження, в якому проводиться моделювання та розрахунок кількості хвиль рою ударних дронів, для нанесення максимального ураження цілей противника.

Проблема, яка виникає, пов'язана з обмеженими можливостями щодо створення необхідного ударного потенціалу рою ударних дронів для нанесення ураження цілей противника [1].

Метою доповіді є розробка моделей та інформаційної технології, за допомогою яких можливе планування хвильових атак ударних дронів, для забезпечення повного ураження цілей противника. Проведено аналіз щодо множини можливих цілей противника, для вибору актуальних для атаки, в умовах обмежених можливостей, щодо створення ударного потенціалу рою бойових дронів. Проведена оцінка створення противником можливого оборонного потенціалу. Це потребує формування необхідного співвідношення ударного та оборонного потенціалів, в умовах обмежених можливостей щодо створення рою дронів. Враховуються обмеження щодо бойових характеристик дронів (час польоту, відстань до цілей, зона ураження, бойове навантаження, тощо). Обмеження, щодо створення рою, не дозволяють використовувати одну хвилю, а потребують запуску декілька хвиль ударних дронів. Створена імітаційна модель руху дронів до цілей противника, яка дозволяє оцінити рівень можливого ураження та ризику знищення дронів, з використанням протидронових засобів противника. Тому, формується необхідна кількість хвиль рою ударних дронів, яка потрібна для повного (або часткового) ураження цілей противника.

Використані математичні методи та моделі: системний аналіз обставин на полі бою; модель виявлення актуальних цілей противника; модель оцінки ударного потенціалу рою дронів; модель аналізу можливих дій противника щодо захисту цілей; модель оцінки ризику ураження цілей противника; модель оцінки ураження рою ударних дронів; оптимізаційна модель для формування необхідної кількості хвиль рою; імітаційна модель для дослідження польоту рою дронів.

Запропоновані моделі та інформаційна технологія дозволяють, перед проведенням атакуючої місії, з використанням рою ударних дронів, оцінити кількість хвиль рою, з урахуванням можливих активних протидронових дій противника, а також в умовах обмежених можливостей щодо створення рою.

Список використаних джерел.

1. Modeling of strike drone missions for conducting wave attacks in conditions of enemy anti-drone actions / O. Fedorovich, D. Krytskyi, M. Lukhanin, O. Prokhorov, Yu. Leshchenko // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2025, № 1 (113), С. 29-43. DOI: 10.32620/reks.2025.1.02

ВЕБ-ЗАСТОСУНОК ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПОДІЯМИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Організація заходів – це комплексний процес планування, організації та проведення заходу від ідеї до реалізації. Це включає всі етапи: від початкової концепції до оцінки результатів після заходу, забезпечуючи ретельну координацію кожної деталі. Це стосується всіх типів заходів, незалежно від того, чи це очні, віртуальні, гібридні чи навіть спеціалізовані вебінари [1].

У сучасному світі організація подій та заходів набуває дедалі більшої ваги в різних сферах діяльності – від корпоративних зустрічей та освітніх семінарів до культурних подій, фестивалів і спортивних змагань. Ефективне планування, координація учасників, інформування аудиторії та контроль за виконанням завдань – це ключові елементи успішного проведення заходів. В умовах швидкого розвитку цифрових технологій традиційні методи організації подій стають менш ефективними, а використання цифрових інструментів – критично необхідним [2,3].

Метою дослідження є розробка веб-застосунку системи керування подіями та заходами для підвищення ефективності роботи організаторів та учасників.

Хоча управління подіями часто ототожнюється з плануванням заходів або координацією зустрічей, воно виходить за рамки простого складання графіка. Воно включає в себе вирішення різних логістичних питань, таких як вибір місць проведення, організація розваг, управління постачальниками та забезпечення безперебійної роботи протягом усього заходу. Конкретний підхід може відрізнятися залежно від розміру заходу, галузі та цілей.

Веб-застосунки для керування подіями дають можливість централізовано планувати та координувати заходи, автоматизувати рутинні процеси (реєстрацію учасників, розсилку повідомлень, формування розкладу тощо), забезпечувати взаємодію між організаторами та учасниками, а також збирати й аналізувати статистичні дані для покращення майбутніх подій.

Для розробки веб-застосунку для керування подіями були використані: база даних MySQL, Node.js, React, Express.

В результаті роботи було розроблено веб-застосунок системи, що забезпечує ефективну роботу організаторів та в майбутньому значно спростить роботу під час планування подій та проведення заходів.

Список використаних джерел

1. Dr. Preeti Arora, Manan Gaur, Hitesh Jaisingh, Ritik Pandey, Tushar Rustagi, "Developing Event Management Web Application", International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), ISSN:2320-2882, Volume.11, Issue 6, pp.d98-d109, June 2023, <http://www.ijcrt.org/papers/IJCRT2306344.pdf>
2. Perez, Maria & Lagman, Ace & Adao, Rossana. (2017). Event Management Solution Using Web Application Platform. pp. 206-211. <https://doi.org/10.1145/3176653.3176677>.
3. Setiawan, Alexander & Adipranata, Rudy & Guna, Bintoro. (2016). Developing Web-Based Project Management Application for Event Organizer ABC. International Journal of Science and Engineering Applications. 5. pp. 217-222. <https://doi.org/10.7753/IJSEA0504.1005>.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НІМЕЦЬКОЇ ЛЕКСИКИ
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій значною мірою вплинув на методи вивчення іноземних мов. Однією з найскладніших складових мовного навчання залишається засвоєння лексики, оскільки цей процес вимагає не лише механічного запам'ятовування, але й глибокого розуміння контексту використання слів. Значна частина наявних цифрових ресурсів зосереджена на англійській мові та не враховує специфіку німецької мови, яка має складну граматичну структуру та велику кількість словоформ. Це створює певні труднощі для мігрантів і студентів, які потребують швидкої мовної адаптації саме до німецькомовного середовища.

На ринку освітніх технологій існує широкий спектр застосунків для вивчення мов, серед яких найбільш поширені Duolingo, Memrise, Babbel. Проте більшість із них не забезпечують належної адаптації до особливостей німецької мови, зокрема в частині граматичних конструкцій, порядку слів у реченнях та специфіки словотвору. Крім того, лише окремі платформи пропонують можливості для індивідуалізації навчання відповідно до рівня знань користувача [1, 2].

Таким чином, метою дослідження є надання автоматизованої підтримки вивчення німецької лексики.

Важливою особливістю цієї системи є її здатність підлаштовувати навчальний контент відповідно до потреб кожного окремого користувача, враховуючи індивідуальні успіхи, помилки та поточний рівень володіння мовою. Це дозволяє досягати більш високої ефективності навчання порівняно зі стандартними підходами, що не враховують різницю в підготовці користувачів.

Основну увагу зосереджено на механізмах визначення рівня знань, що реалізуються як у вигляді вступного тесту при реєстрації, так і під час регулярного використання застосунку. Вступний тест дозволяє сформулювати початковий профіль користувача та підібрати оптимальний рівень складності завдань для подальшого навчання. Регулярне ж оцінювання прогресу забезпечує динамічну адаптацію рівня складності, дозволяючи користувачу рухатись за індивідуальною траєкторією навчання та уникати як надто простих, так і надто складних завдань.

Крім того, у майбутньому можливе впровадження алгоритмів, пов'язаних із нагадуванням про повторення вивченого матеріалу, що базуються на принципах інтервального навчання та кривій забування Еббінгауза [3].

Алгоритми системи забезпечують гнучке реагування на дії користувача та дозволяють зберігати дані про успішність, формуючи основу для подальшої аналітики та персоналізації навчального процесу.

Одним з ключових алгоритмів системи є адаптивне визначення рівня знань користувача на основі результатів виконання вправ. Цей механізм забезпечує динамічне оновлення мовного рівня залежно від успішності у виконанні завдань.

Загальна логіка алгоритму наступна:

- користувач поступово виконує вправи, кожна з яких має маркер рівня складності (A1–C2) та тип (переклад, вставка слова, артикль);
- після накопичення достатньої кількості результатів система аналізує їх, щоб визначити, чи готовий користувач до переходу на наступний рівень.

Математично описати алгоритм можна таким чином:

Нехай $L = \{A1, A2, B1, B2, C1, C2\}$ – множина рівнів. Для кожного рівня $l \in L$ визначається: E_l – усі вправи рівня l , які пройшов користувач; C_l – кількість правильних відповідей на рівні l ; T_l – загальна кількість вправ, виконаних на рівні l ; $P_l = C_l / T_l$ – відсоток успішності на рівні l . Поріг успішності встановлено на рівні $\theta = 0,6$ (60%) оскільки, такий підхід узгоджується з критеріями міжнародних мовних іспитів, де аналогічний поріг використовується для визначення складання іспиту [4, 5].

Таким чином, умова переходу на наступний рівень знань вважається виконаною, якщо користувач досяг успішності не менше 60% на рівні $l+1$ та продемонстрував достатній рівень засвоєння кожного типу вправ. Це показано у формулах (1) та (2).

$$P_{l+1} \geq 0,6 \quad (1)$$

$$\forall t: C_t \geq 5 \text{ та } C_t / T_t \geq 0,6 \quad (2)$$

де P_{l+1} – відсоток правильних відповідей на рівні $l+1$; C_t – кількість правильних відповідей для типу вправ t ; T_t – загальна кількість виконаних вправ типу t .

Діаграму діяльностей для розрахунку поточного рівня користувача представлено на рисунку 1.

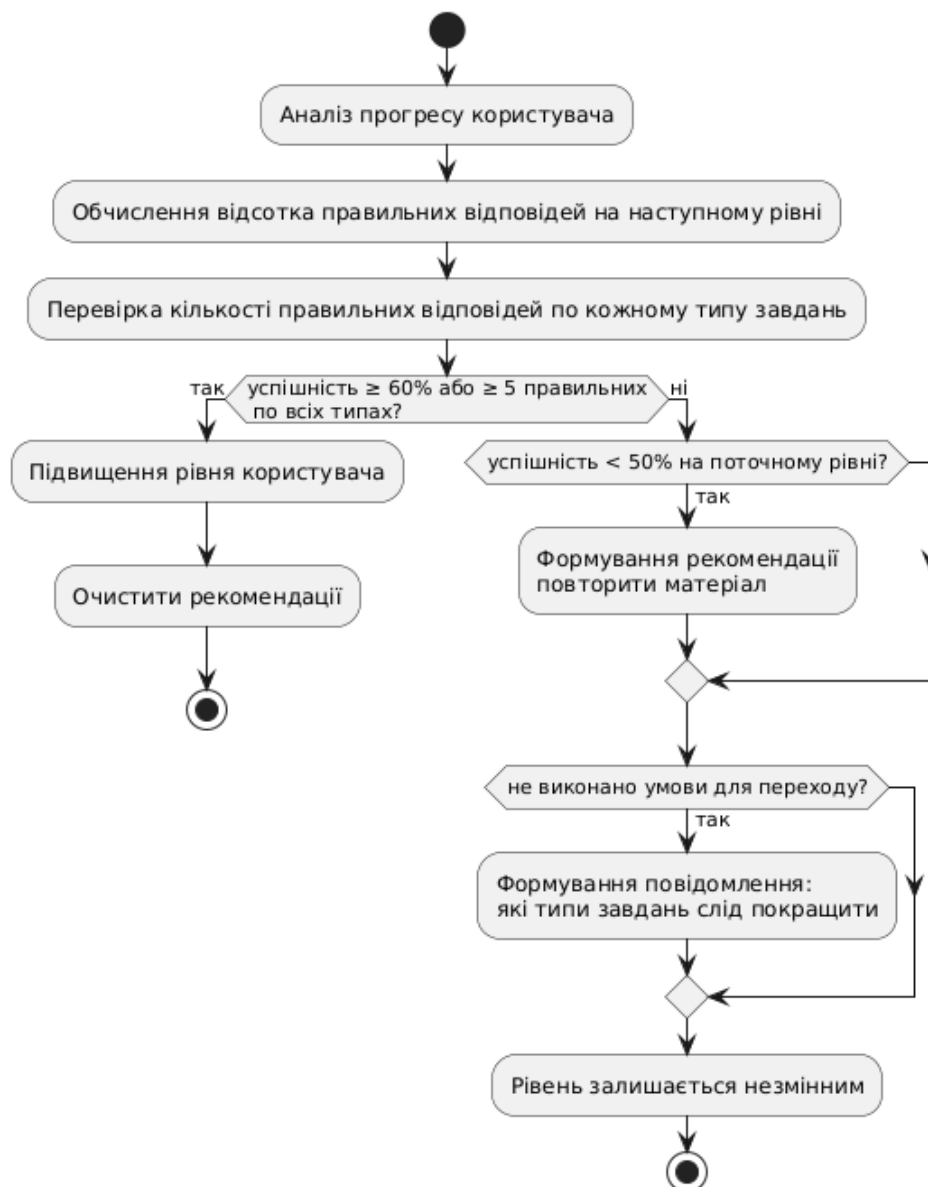


Рис. 1. Діаграма діяльностей для алгоритму переходу між рівнями

Крім того, алгоритм аналізує рівень засвоєння поточного матеріалу. Якщо успішність користувача на поточному рівні (P1) є нижчою за 50%, система формує повідомлення з рекомендацією повторити матеріал. Таке рішення ґрунтується на закономірностях забування, описаних Г. Еббінгаузом, згідно з якими інформація без повторення стрімко втрачається – уже протягом першої доби з пам'яті може зникнути понад 50% нового матеріалу. Отже, результат нижче цього порогу вказує на суттєву втрату знань і потребу в закріпленні вивченого.

Реалізація проєкту забезпечують зручність використання, масштабованість, стабільність та ефективну взаємодію всіх компонентів застосунку.

Здійснено ручне, функціональне та інтеграційне тестування основних компонентів системи, зокрема: аутентифікації, взаємодії з базою даних, виконання вправ, ведення статистики, управління словником і налаштувань. Встановлено, що система стабільно функціонує, забезпечує коректну взаємодію між компонентами, а також відповідає вимогам до швидкодії, зручності та безпеки.

У процесі дослідження було розглянуто основні особливості вивчення німецької мови, проведено аналіз сучасних мовних застосунків та визначено їх недоліки щодо адаптивності навчання і врахування специфіки німецької лексики.

Розроблено концепцію мобільного застосунку для вивчення німецької лексики, спроектовано архітектуру системи на основі патерну Model-View-ViewModel, а також реалізовано базу даних для зберігання користувацьких даних і навчальних матеріалів. Вибір технологій, таких як Kotlin, Jetpack Compose, SQLite та MySQL, обґрунтовано з огляду на вимоги до функціональності та продуктивності застосунку.

Розроблено та впроваджено адаптивний механізм визначення рівня знань користувача на основі результатів вступного тестування, що дозволяє персоналізувати навчання. Проведено тестування роботи застосунку, яке підтвердило коректність реалізованих алгоритмів і відповідність функціональності поставленим вимогам.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання створеного мобільного застосунку для ефективного засвоєння німецької лексики користувачами різного рівня підготовки, що сприяє їхній мовній адаптації в німецькомовному середовищі.

Результати роботи можуть бути використані для подальшого розвитку системи, зокрема для впровадження додаткових типів вправ, розширення словникової бази та інтеграції з зовнішніми освітніми платформами.

Список використаних джерел.

1. Schmitt N. Review article: Instructed second language vocabulary learning // *Language Teaching Research*. – 2008. – Vol. 12, No. 3. – P. 329–363. DOI: 10.1177/1362168808089921.
2. Kang S.H.K. Spaced repetition promotes efficient and effective learning: Policy implications for instruction // *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*. – 2016. – Vol. 3(1). – P. 12–19. DOI: 10.1177/2372732215624708.
3. Roediger H. Remembering Ebbinghaus A Review of Memory: A Contribution to Experimental Psychology by Hermann Ebbinghaus // *Contemporary Psychology: A Journal of Reviews* 1985, Vol. 30, No. 7, P. 519–523. DOI:10.1037/023895.
4. Pane J.F., Steiner E.D., Baird M.D., Hamilton L.S., Pane J.D. Informing Progress: Insights on Personalized Learning Implementation and Effects. – Santa Monica : RAND Corporation, 2017. – 57 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2042.html, вільний.
5. Rosell-Aguilar F. State of the App: A Taxonomy and Framework for Evaluating Language Learning Mobile Applications // *CALICO Journal*. – 2017. – Vol. 34(2). – P. 243–258. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/aae4/477719b64da7b214d9473a6db8f351307df2.pdf>, вільний.

**ПІДБІР ПОСАДИ ПРИ НАВЧАННІ ЗА ДФЗО ДЛЯ ОПАНУВАННЯ/ПОГЛИБЛЕННЯ
КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ В РАМКАХ ДИСЦИПЛІНИ «ПРОЄКТУВАННЯ ГНУЧКИХ
АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЦТВ» ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ
«РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ»**

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Наразі все більш актуальним стає питання запровадження дуальної форми здобуття освіти (далі - ДФЗО), особливо в умовах воєнного стану та мобілізації. В презентації від 13 червня 2024 року [1] розглянуто проблему нестачі кадрів на виробництвах оборонно-промислового комплексу, а також показано перспективу залучення здобувачів вищої освіти до роботи на зазначених підприємствах. Адже здобувачі вищої освіти мають відстрочку від мобілізації, що робить їх найбільш прогнозованою категорією робітників. В цих умовах, роботодавець отримує можливість прогнозування ситуації з кадровим забезпеченням виробництва. Також потрібно враховувати, що ДФЗО – це в першу чергу, форма навчання, яка забезпечує поглиблення саме практичної складової навчання. Враховуючи ситуацію з фактичним переходом на дистанційну освіту ще під час пандемії вірусу COVID-19 та продовженням дистанційного навчання вже під час повномасштабного вторгнення росії в Україну, ДФЗО стає єдиною ефективною формою навчання, особливо для механічних спеціальностей. Адже саме для таких спеціальностей характерна велика кількість практичних занять та лабораторних робіт.

ДФЗО зараз в Україні активно запроваджується і існує достатньо звітів та методичних напрацювань з цього питання. В цих роботах зазначається необхідність кореляції трудових функцій та трудових дій на робочому місці здобувача з компетентностями та програмними результатами навчання (ПРН) відповідної освітньої програми. Як зазначено в п. 2.1 Аналітичного звіту [2], під час підбору підприємств-партнерів для впровадження освіти за дуальною формою необхідно аналізувати ПРН відповідної освітньої програми й підбирати підприємство та посаду для ДФЗО. Використовуючи зазначені напрацювання було проаналізовано ПРН, набуття яких забезпечує дисципліна «Проектування гнучких автоматизованих виробництв», освітньої програми (ОП) «Робототехнічні системи та комплекси». За цими ПРН було проведено перевірку декількох професій, які є в наявності на підприємствах-партнерах. За результатом цієї роботи з використанням методики описаної в п. 2.1 Аналітичного звіту [2], було сформовано відповідну таблицю. Також потрібно зазначити, що таку методику наведено і в Інструментарії ДФЗО [3] та методичних рекомендаціях [4].

Для визначення переліку трудових функцій та трудових дій, характерних для певних посад можна використовувати: посадові інструкції, кваліфікаційні характеристики, професійні стандарти. Також для цього можна та доцільно використовувати опис професій із ЕСКО (Європейські навички, компетенції, кваліфікації та професії) – це європейська багатомовна класифікація навичок, компетенцій та професій [5].

Як можна побачити, основні навички, якими користується фахівець на перевірених посадах корелюють з компетентностями та результатами навчання, які заплановано набути після опанування дисципліни "Проектування гнучких автоматизованих виробництв".

Висновок

Отже, підібрані професії повністю підходять для запровадження ДФЗО за освітньою програмою "Робототехнічні системи та комплекси", а здобувачі, які будуть працювати на зазначених посадах під час навчання за ДФЗО поглиблюють практичну складову вивчення

дисципліни «Проектування гнучких автоматизованих виробництв» та набудуть ряд додаткових навичок, характерних для цих професій.

Організація навчання ДФЗО з таким підходом, дозволяє отримати унікального фахівця-практика, готового для роботи на зазначених посадах відразу після закінчення навчання.

Список використаних джерел

1. Курс підвищення кваліфікації з питань впровадження дуальної форми здобуття освіти у закладах вищої та фахової передвищої освіти / електронний режим доступу - <https://nmc-vfpo.com/programa-pidvyshhennya-kvalifikacziyi-z-pytan-vprovadzhennya-dualnoyi-formy-zdobuttya-osvity-u-zakladah-vyshhoyi-ta-fahovoyi-peredvyshhoyi-osvity/>

2. Аналітичний звіт за результатами другого року пілотного проєкту, що реалізується відповідно до Наказу МОНУ від 15.10.2019 № 1296 «Щодо запровадження пілотного проєкту в закладах фахової передвищої та вищої освіти з підготовки фахівців за дуальною формою здобуття освіти» / автори: О. Бучинська, О. Давліканова, Т. Іщенко, І. Лилик, А. Чайковська, О. Яшкіна. – Київ, 2021. – 188 с.

3. Інструментарій щодо впровадження дуальної форми здобуття освіти (ДФЗО) / електронний режим доступу - <https://era-ukraine.org.ua/instrumentariy-shchodo-vprovadzhennia-dualnoi-formy-zdobuttya-osvity-dfzo/>

4. Методичні рекомендації щодо впровадження дуальної форми здобуття освіти / [Бугайчук В., Бучинська О., Давліканова О., Ковальчук С., Леу-Севериненко С., Лилик І., Перемозова І., Романов М., Серік М., Чайковська А.] ; за заг. ред. М. Романова. – Київ : ТОВ «Вістка», 2023. – 281 с

ESCO (European Skills, Competences, Qualifications and Occupations) / електронний режим доступу - <https://esco.ec.europa.eu/uk>

Наукове видання

**ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
ТРИДЦЯТЬ П'ЯТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»**

2 – 5 вересня 2025 р.

Відповідальний за випуск д-р. техн. наук. О. О. Баранов

Підписано до друку 08.10.2025
Формат 60х84 1/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 12,7. Обл.-вид. арк. 14,25. Наклад 10 пр.
Замовлення 200-25. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001