

В.І. Альохін, А.П. Марченко, С.С. Кравченко

СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЦИЛІНДРУ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА У ПАРАМЕТРИЧНОМУ ПРОСТОРІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ

У статті розглянуто трансформацію підходів до використання систем управління життєвим циклом продукту (PLM) в контексті впровадження технологій Індустрії 4.0 з метою досягнення стратегічних цілей сталого розвитку. На прикладі створення цифрового простору для моделі циліндра двотактного двигуна представлено початковий етап інтеграції з платформою 3DEXPERIENCE, що ілюструє практичну реалізацію концепції цифрового двійника. Зазначено основні тенденції у напрямку подолання глобальних екологічних викликів, зокрема щодо зниження обсягів викидів вуглецю та зменшення споживання природних ресурсів, що виступають критично важливими завданнями на всіх етапах життєвого циклу продукції в автомобілебудуванні. Застосування сталих виробничих технологій розглядається, як ключова передумова забезпечення довгострокової стійкості галузі, шляхом об'єднання економічної ефективності з соціальною відповідальністю та екологічною безпечністю. У межах дослідження розроблено дорожню карту адаптації сучасних принципів проектування та виготовлення литих деталей ДВЗ в контексті технологій Індустрії 4.0. Проведено порівняльний аналіз наявних PLM-систем, що охоплюють широкий спектр функціональних можливостей, кожне з яких має свої сильні сторони та обмеження. На підставі поглибленого оцінювання обґрунтовано вибір платформи 3DEXPERIENCE, яка забезпечує підтримку повного життєвого циклу продукту, включаючи інтеграцію цифрових інструментів проектування, моделювання та управління виробничими процесами. Особливу увагу приділено функціональності платформи в частині організації децентралізованої співпраці завдяки хмарній інфраструктурі та централізованому управлінню даними. У рамках концепції цифрового двійника здійснено створення віртуального простору литої деталі циліндра двотактного двигуна, за допомогою якого забезпечується безперервний зв'язок між цифровою моделлю та реальними виробничими процесами. Розглянуто подальші кроки з модернізації використання інтегрованої цифрової моделі в межах PLM-системи, зокрема моделювання технологічних процесів, аналізу напружено-деформованого стану, а також впровадження інноваційних матеріалів із заданими фізико-механічними характеристиками. У висновках підкреслено перспективи створення високорівневих автономних цифрових двійників нового покоління, що поєднують можливості штучного інтелекту, вбудованих сенсорів і технологій аналітики великих даних, що дозволяє суттєво підвищити гнучкість, адаптивність та сталу ефективність виробничих систем у контексті Індустрії 4.0 з подальшою еволюцією до Індустрії 5.0.

Ключові слова: технології Індустрії 4.0; литі деталі ДВЗ; циліндр двотактного двигуна; проектування; PLM система; цифровий двійник.

Вступ

Сучасний стан розвитку виробництва литих деталей ДВЗ характеризується зростанням вимог до якості та екологічної безпеки продукції, а зважаючи на глобальну конкуренцію інтеграції цифрових технологій Індустрії 4.0 перестає бути лише тенденцією та трансформується у стратегічну необхідність. Із урахуванням, спричинених російською війною проти України, сучасного стану і комплексу проблем вітчизняної промисловості актуальність реалізації цих новітніх технологій стає основною умовою щодо ефективного відновлення та інноваційного розвитку. Таким чином, актуальною задачею є трансформація принципів проектування та технології виробництва, яка є необхідною для посилення зусиль щодо впровадження сталих технологічних практик у виробництво литих компонентів ДВЗ, особливо в контексті підготовки до подальшої інтеграції з європейськими ринками та відповідності глобальним трендам декарбонізації промисловості. Невчасне реагування на ці тенденції може призвести до втрати можливостей модернізації як принципів виробництва, так і технологічних процесів, що, у

свою чергу, ускладнить конкурентну адаптацію підприємств на міжнародному ринку.

Зростаюча увага світової спільноти до екологічної стійкості формує істотний тиск на промисловий сектор, зокрема на автомобілебудування, з вимогою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Такий підхід передбачає всебічне врахування екологічних аспектів на кожному етапі життєвого циклу транспортного засобу — від проектування до утилізації. Попри активну тенденцію до електрифікації транспорту, двигуни внутрішнього згоряння продовжують відігравати суттєву роль у світовому автомобільному парку та, згідно з прогнозами, залишатимуться актуальними в середньостроковій перспективі. Відтак, удосконалення екологічної ефективності виробництва литих компонентів ДВЗ набуває особливої важливості.

У цьому контексті зниження викидів вуглецю, оптимізація використання природних ресурсів та підвищення екологічної безпеки виробничих процесів визначаються як пріоритетні завдання для сучасного автомобілебудування. Стале виробництво

литих деталей ДВЗ набуває особливої актуальності як один із ключових векторів розвитку промисловості в умовах трансформаційної динаміки глобального ринку та посилення екологічного регулювання.

Аналіз сучасного стану виробництва литих деталей ДВЗ та передумови для впровадження технологій Індустрії 4.0

Виробництво литих деталей ДВЗ традиційно характеризується високою енергоємністю, значним споживанням природних ресурсів, а також істотними обсягами викидів парникових газів і утворенням виробничих відходів. У таких умовах перехід до більш сталих технологій виробництва постає як необхідна умова забезпечення довготривалої конкурентоспроможності галузі, що інтегрує економічну ефективність, соціальну відповідальність та екологічну стійкість. Концепція сталого виробництва передбачає реалізацію комплексу техніко-організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу на довкілля, зниження ресурсомісткості та енерговитрат при одночасному збереженні високих показників якості продукції та ефективності виробничих процесів [1].

У контексті сучасних викликів промислового розвитку особливої актуальності набуває впровадження технологій Індустрії 4.0, а в перспективі і концепції Індустрії 5.0, які передбачають цифрову трансформацію виробництва, інтеграцію автоматизованих систем, штучного інтелекту, інтернету речей (IoT), кіберфізичних систем, а також орієнтацію на людиноцентричний та етично-відповідальний підхід до організації виробничого середовища. Характерними особливостями литих деталей ДВЗ є висока матеріаломісткість, складність геометричних форм, жорсткі вимоги до точності та надійності, що робить їх відповідними об'єктами для впровадження цифрових інструментів та інноваційних методів керування життєвим циклом.

Однак, значна частина вітчизняних підприємств, зокрема в ливарному та машинобудівному секторах, досі функціонує на основі застарілих виробничих технологій, що істотно знижує їхню інноваційну спроможність та рівень інтеграції у глобальні виробничо-логістичні ланцюги. Відсутність переходу на цифрові виробничі моделі й сталі практики створює загрозу втрати ринкових позицій в умовах зростаючої глобальної конкуренції. Тому інтеграція технологій Індустрії 4.0 в сучасне виробництво є не лише актуальним трендом, а виступає об'єктивною

необхідністю для забезпечення адаптивності, ефективності та екологічної відповідальності у зазначених галузях.

Традиційна лінійна модель виробництва, що реалізується за схемою «виробництво — використання — утилізація», втрачає ефективність в умовах сучасних вимог сталого розвитку, а існуючі підходи до проектування та організації виробництва литих деталей ДВЗ базуються на фрагментарно застосованих концепціях, таких як класичне конструкторсько-технологічне проектування, часткове врахування етапів життєвого циклу продукції, а також використання технологій швидкого прототипування (Rapid Prototyping) [2]. Тому актуальність переходу до нової парадигми виробництва, що ґрунтується на принципах циркулярної економіки, цифрової інтеграції та енергоефективності є необхідним кроком для формування єдиної методологічної бази з впровадження технологій Індустрії 4.0 в системи проектування та виготовлення литих деталей ДВЗ.

PLM-платформа, як ключовий інструментарій формування методології адаптації сучасних принципів проектування і виробництва литих деталей ДВЗ в контексті Індустрії 4.0

Системи управління життєвим циклом продукту (PLM) відіграють центральну роль у процесі формування інтегрованої методології адаптації новітніх принципів проектування та виробництва литих деталей ДВЗ у контексті реалізації технологій Індустрії 4.0 та 5.0. В умовах інтенсифікації викликів сталого розвитку актуальним завданням для промисловості України є створення такої методології, що дозволить поєднати інноваційні цифрові рішення з принципами екологічної, економічної та соціальної відповідальності. Застосування інструментарію PLM у поєднанні з найкращими міжнародними практиками створює передумови для підвищення конкурентоспроможності української промисловості на глобальному рівні. Розв'язання цього завдання вимагає трансформації існуючої виробничої парадигми на основі комплексного впровадження технологій цифрового виробництва, автоматизації, параметричного проектування та циркулярної економіки.

Дорожню карту реалізації зазначених етапів, що сприятимуть структурним змінам у проектуванні й виробництві, наведено на Рис. 1.

Одним із основних завдань на етапі створення алгоритму параметризації литих деталей ДВЗ є інтеграція у простір системи управління життєвим циклом продукту (PLM).



Рис. 1. Дорожня карта етапів методології адаптації нових принципів проектування і виробництва литих деталей ДВЗ в контексті Індустрії 4.0

Управління життєвим циклом у сталому виробництві деталей ДВЗ забезпечує значний прогрес у зменшенні екологічного впливу та підвищенні ефективності використання ресурсів. Впровадження інноваційних технологій, оптимізація виробничих процесів та перехід до циркулярної економіки дозволяють знизити негативний екологічний вплив, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити сталий розвиток галузі.

Дизайн литих деталей ДВЗ із використанням такого підходу базується на використанні сучасних технологій, інноваційних матеріалів та інтеграції екологічних практик у весь життєвий цикл продукції. Перехід до сталого виробництва деталей забезпечує не лише зменшення екологічного впливу, але й підвищення конкурентоспроможності підприємств, а PLM-системи відкривають широкі можливості для цифрової трансформації процесів проектування та виробництва, забезпечуючи централізоване управління даними про продукт протягом усього його життєвого циклу. На всіх етапах, від створення концептуальної моделі до остаточного виробництва, зберігається цілісність та актуальність інформації про геометрію деталі, матеріали, технологічні параметри, зміни в конструкції та версії цифрового двійника, що мінімізує ризики втрати або спотворення

даних, особливо в умовах міжфункціональної взаємодії.

Сучасні PLM-рішення успішно інтегруються з іншими корпоративними системами, зокрема ERP (планування ресурсів підприємства), QMS (управління якістю), SCM (керування ланцюгами постачання) та EAM (управління активами підприємства), що підсилює їхню універсальність і гнучкість у реалізації складних проєктів. Параметризація як функціональний компонент PLM дозволяє здійснювати оперативну зміну ключових характеристик виробу (товщина стінок, конфігурація камери згоряння, геометрія ребер жорсткості тощо) відповідно до оновлених нормативних вимог або інженерних рішень. Крім того, PLM-системи забезпечують інтеграцію з програмами для інженерного аналізу та моделювання, що дозволяє прогнозувати поведінку виробів у реальних умовах експлуатації, оптимізувати конструкцію литих деталей ДВЗ за необхідними критеріями.

Невід'ємним елементом запропонованого підходу є аналіз екологічного впливу ще на етапі проєктування, за допомогою якого забезпечується вибір більш сталих матеріалів та мінімізується кількість відходів. Таким чином, впровадження PLM у про-

цеси проектування литих деталей ДВЗ дозволяє суттєво скоротити терміни розробки, підвищити якість продукції, зменшити виробничі витрати й екологічне навантаження, що відповідає принципам сталого розвитку.

Порівняльний аналіз актуальних PLM-систем з 3DEXPERIENCE у контексті сталого проектування литих деталей ДВЗ

Одним із найбільш комплексних прикладів програмного забезпечення, що реалізує принципи

повного управління життєвим циклом виробу, є інтегрована платформа **3DEXPERIENCE** від компанії *Dassault Systemes*. В основі цього програмного продукту лежать ініціативи щодо розробки та надання нового покоління інструментів проектування та розробки технологічних виробів, у тому числі литих деталей ДВЗ, а також надається можливість управління інформацією та спільної роботи через хмарну інфраструктуру незалежно від географічного розташування користувачів (Рис. 2).



Рис. 2. Структура можливостей PLM платформи 3D EXPERIENCE

В основі 3DEXPERIENCE лежить концепція до створення нового покоління цифрових інженерних інструментів, що дозволяють не лише проектувати складні вироби, але й здійснювати повноцінне управління даними про продукт у межах міждисциплінарної співпраці. Прикладом ефективного використання цієї платформи є її застосування в рамках проєкту «Real Time Mining» по дослідженню можливостей сталого використання природних ресурсів, реалізованого за підтримки Європейського Союзу в межах програми Horizon 2020, координатором якого виступив Інститут передових гірничих технологій (AMT) у співпраці з 13 іншими організаціями. На відміну від інших PLM-систем 3DEXPERIENCE побудована на концепції єдиної централізованої моделі віртуального двійника, який дозволяє гармонізовано інтегрувати специфікації всіх дисциплін (CAD, CAE, CAM тощо) у межах одного середовища. Велика кількість функціональних модулів платформи згруповані в рольові та галузеві пакети рішень, які адаптовані до потреб конкретних користувачів і розширюються залежно від вимог [3].

Окрім 3DEXPERIENCE, на ринку PLM-систем представлені й інші потужні інструменти, такі як Siemens Teamcenter та PTC Windchill, котрі є комплексними платформами з багатофункціональним інструментарієм, орієнтованим на машинобудівну галузь.

Siemens Teamcenter — комплексна платформа, яка розроблена для потреб великих підприємств, що забезпечує потужну інтеграцію між системами CAD, моделювання та виробничими операціями. Її функціонал вважається дуже стабільним для створення дерев продуктів, який забезпечує безперебійне управління життєвим циклом продукту, функціональність перевірки та відстеження модифікацій із забезпеченням належного управління специфікаціями матеріалів (BOM) [4].

PTC Windchill, зі свого боку, вирізняється високим ступенем інтеграції з технологіями Інтернету речей (IoT) та доповненої реальності (AR), що дозволяє суттєво підвищити продуктивність, автоматизувати виробничі процеси та прискорити виведення продуктів на ринок. Платформа слугує

централізованим сховищем інженерної документації з розвинуеною системою контролю версій та доступу. Вона також підтримує багатформатну інтеграцію з провідними CAD-середовищами, а також пропонує потужні засоби управління змінами, специфікаціями матеріалів і взаємодією з постачальниками [5].

Загалом, велика кількість та різноманітність PLM-платформ на сучасному ринку, [6] свідчить про високий ступінь диверсифікації галузі, де представлені, як зазначені вище, комплексні рішення, так і спеціалізовані продукти, орієнтовані на окремі функціональні або галузеві потреби. Комплексні системи зазвичай пропонують уніфіковане середовище для багатофункціональної взаємодії, тоді як вузько-спеціалізовані рішення можуть надавати гнучкіші або економічно доцільніші варіанти для обмежених задач.

Вибір конкретної PLM-платформи залежить від низки чинників: специфіки галузі, складності продукту, бюджету, наявних ІТ-ресурсів, потреб в інтеграції та рівня готовності до цифрової трансформації. У цьому контексті платформу 3DEXPERIENCE можна розглядати як стратегічно доцільний вибір для підприємств, що прагнуть до комплексної модернізації проєктно-виробничої діяльності у відповідності з технологіями Індустрії 4.0 та принципами сталого розвитку.

Створення віртуального двійника циліндру двотактного двигуна на базі платформи 3D EXPERIENCE

У контексті цифрової трансформації виробництва литих деталей ДВЗ концепція цифрового двійника передбачає створення інтегрованої віртуальної моделі виробу, яка динамічно корелюється з відповідним фізичним об'єктом на всіх етапах його життєвого циклу. Такий цифровий двійник акумулює геометричні характеристики, дані про матеріали, параметри технологічних операцій, інформацію з сенсорних систем виробничого обладнання, а також результати комп'ютерного моделювання та аналітичної обробки даних. При цьому зберігається забезпечення двостороннього безперервного обміну даними між фізичною та цифровою ітерацією об'єкта, що дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі, проводити глибокий аналіз виробничих і експлуатаційних параметрів, а також приймати обґрунтовані рішення з оптимізації технічних характеристик виробу та підвищення ефективності виробничих процесів. Застосування чисельного моделювання, алгоритмів машинного навчання та інструментів

аналітики великих даних у межах цифрового двійника дозволяє прогнозувати поведінку деталі за різних експлуатаційних сценаріїв, варіантів навколишнього середовища та конструктивних змін без необхідності створення фізичних прототипів.

У рамках концепції, що пропонує Dassault Systemes, поняття віртуального двійника виходить за межі класичного цифрового представлення, охоплюючи повну імітацію поведінки об'єкта в реальному часі, включаючи еволюцію його стану протягом усього життєвого циклу, починаючи з етапу «як спроектовано», через «як виготовлено», до «як експлуатується».

Початковим етапом у створенні віртуального двійника є побудова 3D-моделі з урахуванням геометричних параметрів, властивостей матеріалів та технологічних обмежень. У межах даного дослідження, для розробки і проєктування циліндру двотактного двигуна, було створено віртуальний двійник, який забезпечує зв'язок між віртуальним і фізичним виміром, задля своєчасного корегування віртуальної моделі та гарантування відповідності кінцевого виробу заданим технічним характеристикам (Рис. 3).

Подальший розвиток цього підходу передбачає проведення оптимізації дизайну, вибору матеріалів і параметрів технологічного процесу з використанням функціоналу чисельного моделювання. Всі етапи прийняття рішень документуються у цифровому середовищі, що забезпечує повну маршрутизацію змін. У перспективі цифровий двійник розширюватиметься за рахунок оперативних даних з виробництва, показників експлуатації та історії обслуговування, що дозволить формувати цілісний підхід до управління продуктом на основі даних та підтримувати адаптивне управління впродовж усього життєвого циклу [7].

Висновки

Запропоновано новий трансформаційний підхід до процесів проєктування та технології виробництва литих компонентів ДВЗ, використання якого дозволило створити цифровий двійник 3D-моделі деталі циліндру у просторі PLM-платформи 3DEXPERIENCE, що надалі дозволить суттєво підвищити гнучкість, адаптивність та сталу ефективність виробничої систем у контексті Індустрії 4.0.

Використання зазначеного підходу у подальших роботах цього напрямку створює умови для посилення зусиль щодо впровадження сталих технологічних практик у виробництво.

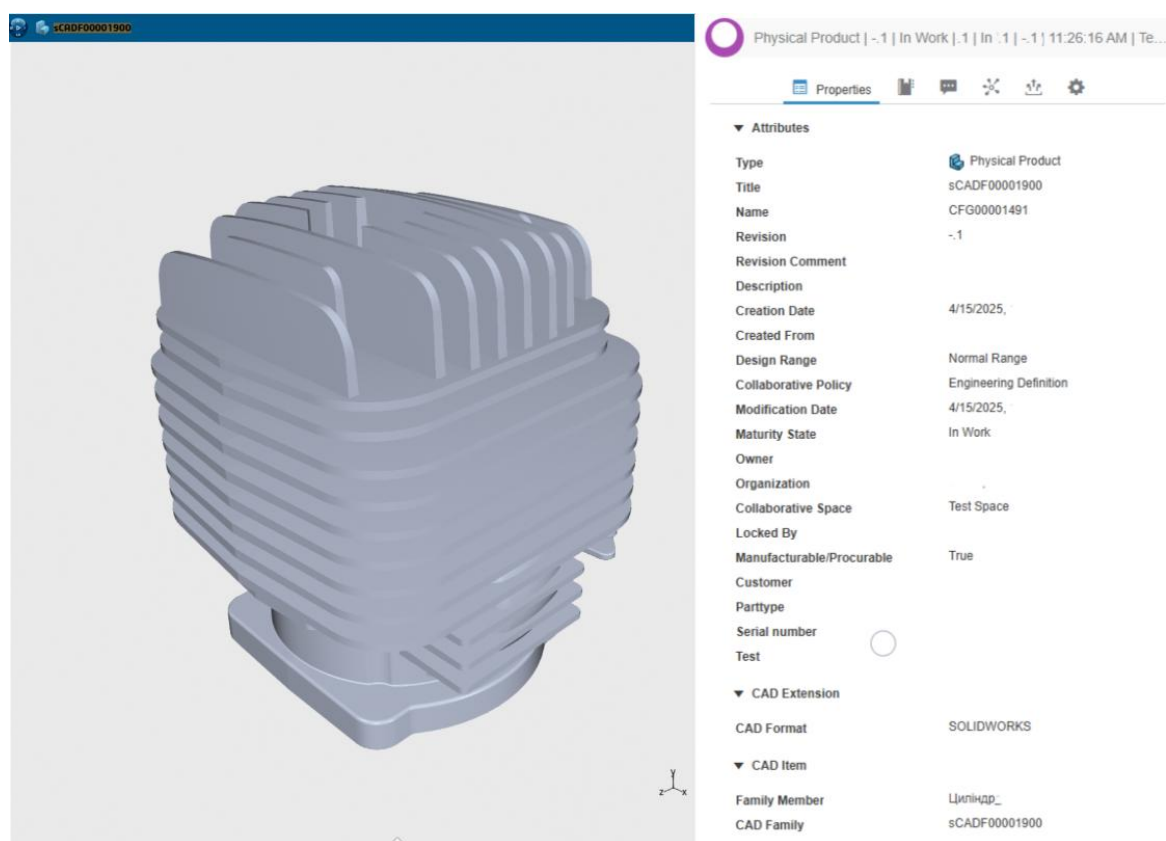


Рис. 3. Цифровий двійник циліндру, параметризований у середі платформи 3D EXPERIENCE

З переходом від Індустрії 4.0 до Індустрії 5.0 впровадження принципів сталості, стійкості та людиноцентричності [8] акценти поступово зміщуються до розвитку PLM-платформ та цифрових двійників, що призводить не лише до ефективності, а й до ширшого впливу на екологічні зміни та суспільство. Постійні досягнення у сфері сенсорних технологій, обробки даних і машинного навчання сприяють формуванню більш складних та автономних цифрових двійників, тоді як застосування алгоритмів штучного інтелекту при розробці нових матеріалів трансформують промислову інноваційну діяльність. Використання інструментарію PLM-платформ можна розглядати як стратегію, що об'єднує різні системи і створює чітку структуру даних та дозволяє глобальним підприємствам працювати, як єдина команда над проектуванням, виробництвом, підтримкою і виводом виробів в експлуатацію, накопичуючи та враховуючи отриманий досвід.

Майбутнє платформ PLM та цифрових двійників характеризується швидким зростанням та глибокою інтеграцією з передовими технологіями, що прокладає шлях до наступних промислових революцій. Очікується, що глобальний ринок цифрових двійників досягне 63,5 мільярда доларів до 2027 року, зростаючи на 41,7% [9]. Міжнародна корпора-

ція даних (IDC) прогнозує, що до 2027 року 60% нових фізичних активів та процесів будуть моделюватися як цифрові двійники [10].

Постійні досягнення в галузі штучного інтелекту, датчиків та аналітики даних сприяють створенню ще більш складних та автономних цифрових двійників. У такій динаміці компанії, які наразі не інвестують у PLM-технології, ризикують втратити конкурентну позицію, адже майбутні моделі розвитку та виробництва будуть невід'ємними від віртуальних представлень, що ставатимуть дедалі інтелектуальнішими, взаємопов'язаними та стратегічно важливими для бізнесу. Відтак раннє впровадження та постійне нарощування PLM-рішень є ключовими передумовами довгострокової конкурентоспроможності та спроможності до сталих інновацій.

Подальший напрямок робіт пов'язаний зі створенням нової парадигми впровадження сучасних технологій моделювання технологічних процесів та аналізу напружено-деформованого стану, на основі 3D-моделі деталі циліндру і відповідного параметричного простору PLM-платформи.

Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту 2023.04/0124 «Поліпшення тактико-технічних характеристик вітчизняних БПЛА шляхом розробки авіаційного двигуна з перспективними показниками питомої потужності».

The research was carried out with the grant support of the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the project 2023.04/0124 "Improving the tactical and technical characteristics of domestic UAVs by developing an aircraft engine with promising specific power indicators."

Список літератури:

1. Sustainable Manufacturing [Electronic resource] / ed. by R. Stark, G. Seliger, J. Bonvoisin. – Cham : Springer International Publishing, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48514-0>. 2. Onuh, S.O. Rapid prototyping technology: Applications and benefits for rapid product development / S.O. Onuh, Y.Y. Yusuf // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 1999. – 10. – P. 301–311. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1008956126775>. 3. Buttgerit D. Real-Time Mining Control Cockpit: A Framework for Interactive 3D Visualization and Optimized Decision Making Support / D. Buttgerit, S. Bitzen, J. Benndorf, M.W.N. Buxton // *REAL TIME MINING - Conference on Innovation on Raw Material Extraction*. – Amsterdam. – 2017. – P 90. 4. Automating simulation processes to streamline automotive design workflows. URL: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-denso-corporation/?bc=eyJwYWdlIjoIbnVBN0xXd3dYMIWwUnRkMDIvcDREQSIInNpdGUiOiJkaXN3IiwibG9jYWxlIjoIZW4tVVMifQ==> (дата звернення 10.05.2025). 5. A Comprehensive Introduction to PTC's Windchill PLM: (Features and Benefits). URL: <https://3hti.com/plm/a-comprehensive-introduction-to-ptcs-windchill-plm-features-and-benefits/> (дата звернення 10.05.2025). 6. The Best Digital Twin Solutions for Manufacturers in 2025. URL: <https://manufacturingdigital.com/articles/best-digital-twin-solutions-manufacturers> (дата звернення 10.05.2025). 7. How Virtual Twins are Transforming the Future of Digital Twins?. URL: <https://www.3ds.com/virtual-twin> (дата звернення 10.05.2025). 8. Lehmhus D. Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part I: Changing Markets, Changing Products / D. Lehmhus // *Metals*. – 2022. – 12(11):1959. doi: <https://doi.org/10.3390/met12111959>. 9. Teaching Virtual

Factory with DELMIA. URL: <https://www.3ds.com/edu/education/academics/3dexperience/delmia-package> (дата звернення 10.05.2025). 10. Data's New Dimension: 3D Dashboards and Digital Twins. URL: <https://www.treedis.com/post/datas-new-dimension-3d-dashboards-and-digital-twins> (дата звернення 10.05.2025).

Bibliography (transliterated):

1. Stark, R., Seliger, G. and Bonvoisin, J. eds., (2017). Sustainable Manufacturing. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Cham: Springer International Publishing. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48514-0>. 2. Onuh, S.O. and Yusuf, Y.Y. (1999). Rapid prototyping technology: Applications and benefits for rapid product development. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(3/4), pp.301–311. doi: <https://doi.org/10.1023/a:1008956126775>. 3. Buttgerit D., Bitzen S., Benndorf J., Buxton M.W.N. (2017). Real-Time Mining Control Cockpit: A Framework for Interactive 3D Visualization and Optimized Decision Making Support. *REAL TIME MINING - Conference on Innovation on Raw Material Extraction*, Amsterdam, P 90. 4. Siemens Digital Industries Software. (2022). Automating simulation processes to streamline automotive design workflows. [online] Available at: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-denso-corporation/?bc=eyJwYWdlIjoIbnVBN0xXd3dYMIWwUnRkMDIvcDREQSIInNpdGUiOiJkaXN3IiwibG9jYWxlIjoIZW4tVVMifQ==> (Accessed 10.05. 2025). 5. 3HTi (2025). A Comprehensive Introduction to PTC's Windchill PLM: (Features and Benefits). [online] 3 HTi System Integrator and Solutions Support Provider. Available at: <https://3hti.com/plm/a-comprehensive-introduction-to-ptcs-windchill-plm-features-and-benefits/> (Accessed 10.05. 2025). 6. Brown, R. (2025). The Best Digital Twin Solutions for Manufacturers in 2025. [online] *Manufacturingdigital.com*. Available at: <https://manufacturingdigital.com/articles/best-digital-twin-solutions-manufacturers> (Accessed 10.05. 2025). 7. Dassault Systèmes. (2021). Virtual Twin Experiences. [online] Available at: <https://www.3ds.com/virtual-twin> (Accessed 10.05. 2025). 8. Lehmhus, D. (2022). Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part I: Changing Markets, Changing Products. *Metals*, 12(11), p.1959. doi: <https://doi.org/10.3390/met12111959>. 9. Dassault Systèmes. (2023). user. [online] Available at: <https://www.3ds.com/edu/education/academics/3dexperience/delmia-package> (Accessed 10.05. 2025). 10. Treedis.com. (2023). Data's New Dimension: 3D Dashboards and Digital Twins. [online] Available at: <https://www.treedis.com/post/datas-new-dimension-3d-dashboards-and-digital-twins> (Accessed 10.05. 2025).

Надійшла до редакції 08.07.2025 р.

Альо́хін Віта́лій І́горович – канд. техн. наук, докторант кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: vitalii.alokhin@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6290-5994>

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

Кравченко Сергій Сергійович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Serhii.Kravchenko@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3250-8645>.

CREATING A DIGITAL TWIN FOR A TWO-STROKE ENGINE CYLINDER IN THE PARAMETRIC DOMAIN OF A PLM SYSTEM

V.I. Alokhin, A.P. Marchenko, S.S. Kravchenko

The article explores the transformation of approaches to the use of Product Lifecycle Management (PLM) systems in the context of Industry 4.0 technologies, aimed at achieving strategic goals of sustainable development. Using the example of creating a digital environment for the two-stroke engine cylinder model, the initial stage of integration with the 3DEXPERIENCE platform is presented, demonstrating the practical implementation of the digital twin concept. The study identifies key trends in addressing global environmental challenges, particularly the reduction of carbon emissions and the minimization of natural resource consumption—both of which represent critical tasks throughout all stages of the automotive product lifecycle. The application of

sustainable manufacturing technologies is considered a key prerequisite for ensuring the long-term resilience of the industry by combining economic efficiency with social responsibility and environmental safety. As part of the research, a roadmap for adapting modern design and manufacturing principles of cast internal combustion engine (ICE) components within the framework of Industry 4.0 technologies was developed. A comparative analysis of existing PLM systems was carried out, covering a wide range of functional capabilities, each with its own strengths and limitations.

Based on a thorough evaluation, the 3DEXPERIENCE platform was reasonably selected due to its support for the full product lifecycle, including the integration of digital design, simulation, and production management tools. Particular attention is paid to the platform's functionality in enabling decentralized collaboration through cloud infrastructure and centralized data management. Within the digital twin concept, a virtual environment for the cast cylinder component of a two-stroke engine was created, ensuring continuous synchronization between the digital model and real-world manufacturing processes. Further steps for the modernization of the integrated digital model within the PLM system are discussed, including process simulation, stress-strain analysis, and the implementation of innovative materials with predefined physical and mechanical properties. The conclusions highlight the prospects for the development of next-generation, high-level autonomous digital twins that combine artificial intelligence, embedded sensor systems, and big data analytics—enabling significantly greater flexibility, adaptability, and sustainable efficiency in manufacturing systems within the context of Industry 4.0 and its evolution toward Industry 5.0.

Keywords: Industry 4.0 technologies; cast ICE components; two-stroke engine cylinder; design; PLM system; digital twin.

УДК 621.43.031

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.04

І. Г. Пожидаєв, О. Ю. Лінков

КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА СИСТЕМОЮ АКУМУЛЯТОРНОГО ТИПУ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ НА ПРИВІД НАСОСА

Відповідність сучасним екологічним стандартам та вимогам до паливної економічності є основними завданнями, що стоять перед виробниками дизельних двигунів. Для вирішення цих завдань вживаються заходи з інтенсифікації подачі палива та гнучкого управління її параметрів. Значною мірою виконання цих заходів забезпечують сучасні паливні системи (ПС) акумуляторного типу (системи Common Rail (CR)). Проте в такій ПС частина палива, що нагнітається паливним насосом високого тиску (ПНВТ) до акумулятора, є надмірною і скидається клапаном регулювання тиску до паливного бака. Відповідно частина механічної енергії, яку затрачено на привід ПНВТ, втрачається, що негативно позначається на ефективних та екологічних показниках двигуна. Особливо суттєвою є доля втрат на привід ПНВТ у малолітражних двигунах, що зумовлює необхідність вживати заходи щодо їх зменшення.

У статті наведено результати літературного огляду щодо рівня механічних втрат на привід паливного насоса високого тиску дизельного двигуна, способів регулювання ефективності ПНВТ на відповідних режимах роботи двигуна, а також обґрунтування необхідності керування подачею паливного насоса високого тиску, що входить до складу паливної системи акумуляторного типу, з метою зменшення механічних втрат на привід ПНВТ.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що для зменшення втрат потужності на привід ПНВТ, а значить - підвищення механічного та ефективного ККД дизельного двигуна з акумуляторною паливною апаратурою, до складу останньої необхідно вводити пристрій, що забезпечує змінення подачі незалежно від частоти обертання вала насоса і тиску у акумуляторі. Подальший напрям роботи пов'язаний з розробленням концепції конструкції ПНВТ, що дозволить зменшити механічні втрати дизеля на привід паливного насоса шляхом керування його подачею, а також розробкою математичних моделей, необхідних для опису та дослідження процесів у паливній системі двигуна.

Ключові слова: паливний насос високого тиску; акумуляторна паливна система; механічні втрати; дизельний двигун.

Вступ

Поступове впровадження більш жорстких екологічних стандартів з метою зменшення шкідливого впливу двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на навколишнє середовище зумовлює необхідність шукати рішення, спрямовані на забезпечення відповідності двигунів сучасним екологічним стандартам із збереженням мінімального рівня витрат палива. Для вирішення цих завдань вживаються заходи з оптимізації процесів сумішоутворення та згоряння палива,

на які значною мірою впливає процес подачі палива. Відповідно, для покращення екологічних показників дизельного двигуна необхідно вдосконалювати паливну апаратуру з метою інтенсифікації подачі палива та гнучкого управління її параметрами. Накопичений досвід демонструє (рис. 1), що відповідність екологічним стандартам досягається в тому числі за рахунок збільшення тиску впорскування палива.