

УДК 621.436

**В.О. Пильов, д-р техн. наук, А.Ф. Шеховцов, д-р техн. наук, В.С. Вікторов, інж.,
В.Т. Турчін, інж.**

ЗАГАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДВЗ

Створення нового двигуна внутрішнього згорання є вкрай складним та довготривалим процесом, в якому задіяні колективи вчених, конструкторів, спеціалістів в області випробувань, виробництва, експлуатації ДВЗ. Інтегрованою метою їх спільного труда є отримання конструкції з найкращим сполученням значень комплексу критеріїв її якості. До цього комплексу насамперед відносять ефективну потужність двигуна, економічність по паливу і маслу, токсичність викидів, рівень шуму і вібрації, вагові і габаритні параметри, надійність, ресурс, ремонтпридатність, собівартість, інші показники в залежності від призначення силового агрегату. Сьогодні для розробки об'єкту проектування за потреб оптимальності такого складного комплексу функцій цілі, окрім вказаного, намагаються враховувати специфіку усіх стадій життєвого циклу конструкції (ЖЦК), як передумову ефективного створення та використання майбутнього двигуна в експлуатації.

Розв'язання цього питання в умовах жорсткої конкуренції серед двигунобудівних фірм світу, особливо з урахуванням інтенсивного впровадження та найширшого використання в повсякденній інженерній практиці комп'ютерних технологій підтримки ЖЦК, слід вважати вкрай актуальним. Вагомість окресленої проблемної задачі суттєво зростає у зв'язку з обмеженістю комплексного її розгляду в вітчизняній літературі стосовно до розробки перспективних конструкцій двигунів внутрішнього згорання.

Метою роботи є висвітлення загальних підходів щодо автоматизації етапів життєвого циклу ДВЗ та означення подальших практичних шляхів підвищення ефективності проходження сукупності усіх етапів ЖЦК.

Життєвий цикл ДВЗ з використанням комп'ютерних технологій розподіляють на стадії науково-технічного пошуку, розробки, виробництва, спрямування, експлуатації [1-3]. На кожній стадії окреслюють окремі основні етапи, які складаються з наборів підетапів, конкретних процедур та операцій. Стадії та основні етапи ЖЦК ДВЗ як складної технічної системи подано на рис. 1. Розглянемо їх.

Стадія науково-технічного пошуку передбачає планування подальшого комплексу робіт та виконання фундаментальних і прикладних наукових досліджень. Тут на першому основному етапі (планування) встановлюється необхідність і строки розробки нових конструкцій, з'ясовується доцільність використання конкретних прогресивних проектно-

технологічних рішень, визначається рівень показників якості перспективних двигунів. Неодмінною сучасною процедурою етапу планування слід вважати виконання розподілу (чи сегментації) ринку, тобто орієнтацію проекту на обраний сегмент умов експлуатації. Це дає можливість найбільш повно врахувати особливості потреб споживачів та встановити відповідність нового двигуна певним специфічним умовам його майбутнього використання за призначенням [4-7].

Принципова можливість створення нового двигуна встановлюється на етапі науково-дослідних робіт. Вона базується на всебічному науково-технічному аналізі, обґрунтуванні, конкретизації і деталізації нових конструктивних рішень. Важливим елементом досліджень тут є експеримент. З використанням комп'ютерних технологій підтримки ЖЦК основна вага перекладається на використання математичних моделей і, відповідно, проведення чисельного експерименту. Завершенням етапів планування і науково-дослідницьких робіт є формулювання технічного завдання (ТЗ) на проектування нового двигуна. Головною вимогою тут є достовірний прогноз перспективного рівня сукупності показників якості об'єкту проектування на період часу, що є не меншим за час ЖЦК. За означенням роботи [8] стадія науково-технічного пошуку є зовнішнім проектуванням.

Відомо, що комп'ютерній технології етапу планування відповідає автоматизована система планування (АСП), а етапу дослідницьких робіт – автоматизована система наукових досліджень (АСНД).

Розробка – стадія комп'ютерної технології, яка займає сьогодні найвагоміше місце в ЖЦК. Скорочення часу розробки – одна з головних цілей двигунобудівних фірм. Тут етапу проектування відповідає система автоматизації проектно-конструкторських робіт – САПР (CAD, CAE, CAD/CAE), підготовці виробництва – автоматизована система підготовки виробництва (АСТПВ, САМ). Етапу освоєння виробництва частково можна поставити у відповідність систему промислового проектування (СПП, САІД) [9]. Ефект від інтеграції цих систем в єдиному комплексі CAD/CAE/CAM (або ІПТ, С-3) передбачає можливість скорочення часу проектування у порівнянні до традиційних методів майже на третину. Вважається, що водночас зменшуються втрати на проведення вказаних робіт.

Для підвищення продуктивності праці користувачів ІПТ-систем за рахунок впровадження нових

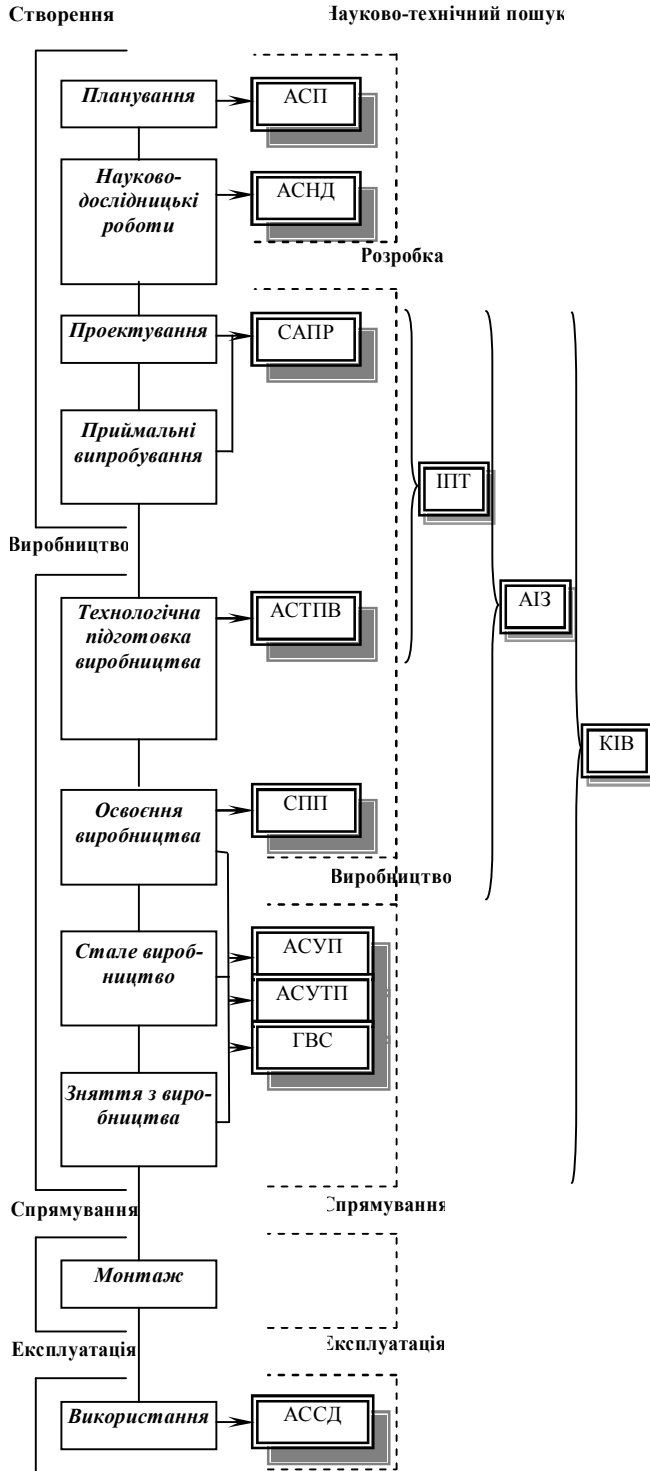


Рис.1. Стадії, основні етапи та автоматизовані системи підтримки життєвого циклу конструкції:

- стадії за традиційною технологією;
- стадії за комп'ютерною технологією;
- основні етапи;
- автоматизовані системи

методів виконання рутинних операцій, реалізації максимально можливої автоматизації допоміжних підетапів проектних робіт, зменшення кількості неузгоджених варіантів проекту, що функціонують в ЖЦК, створюються і активно поступають на ринок програмних продуктів (у тому числі сумісних з програмними продуктами підтримки САПР/АСТПП ДВЗ) програмні засоби електронного використання технічної документації. Вони інтегрують можливості систем обслуговування трьох класів: управління технічною документацією (TDM); управління даними про об'єкти проектування (PDM); управління процесами розробки складних технічних систем (Workflow).

В першу чергу тут створюються TDM/PDM-комплекси, які призначені для вирішення наступних основних задач: зберігання різноманітних документів; управління доступом до документів; внесення змін в документи та управління поточними варіантами виконання документів; узгодження та затвердження документів; підтримки групової роботи над проектом. Ці задачі вирішуються з використанням центрального архіву підприємства.

Відповідно до функціонування TDM/PDM-систем централізований архів підприємства – це база даних, де зберігаються проектні документи та інформація, яка є необхідною для пошуку потрібних документів. Архів формується за статусом документів (затверджено, незатверджено) та їх типом (конструкторські, технологічні). Увесь архів складається з декількох підархівів: головного конструктора, головного технолога, певного конструкторського відділу, сектора тощо. Система контролює переміщення документів між цими підархівами та дозволяє зберігати довільну документацію – креслення, специфікації, текстові документи, посилання на документи, які виконано на паперових носіях тощо. Кожен учасник проекту може додати в архів нові документи. З метою відображення історії редагування документів та створення їх альтернативних варіантів використовується тривірнева схема збереження змін змісту документів: документ–версія–ітерація.

TDM/PDM-система надає управління структурою та іншими даними щодо об'єкта проектування. Вона здійснює автоматичне зчитування складу виробу з моделі складальної одиниці та її зберігання в архіві конструкторських специфікацій. В архіві також реєструються зв'язки між різними файлами даних, наприклад, зв'язки між складальними кресленнями і відповідними тривимірними моделями деталей, між моделями деталей і їх робочими кресленнями, між цією сукупністю документів і їх текстовим описом. Дані з архіву передаються по комп'ютерній мережі. Водночас системою контролюються права доступу користувачів до документів. Розвинуті засоби розмежування доступу дозволяють призначати різним користувачам різні права використання кожного окремого документа або групи документів.

Система Workflow дозволяє ефективно управляти завданнями в процесі проходження проекту, виконувати погодження та затвердження документів. З метою підтримки процесу виконання робіт в Workflow за допомогою спеціалізованого редактора ілюстративної графіки створюється діаграма цього процесу. Відповідно до організаційної будови підприємства та методичного забезпечення проекту вказана

діаграма утворює граф, кожен вузол якого позначає певний підетап виконання робіт. Зв'язки між вузлами визначають послідовність підетапів, паралельні та послідовні шляхи проходження документів. Діаграма, що створюється, передбачає дотримання принципу ітераційності проектування. Можливий вигляд діаграми управління процесом виконання проектних робіт подано на рис. 2.

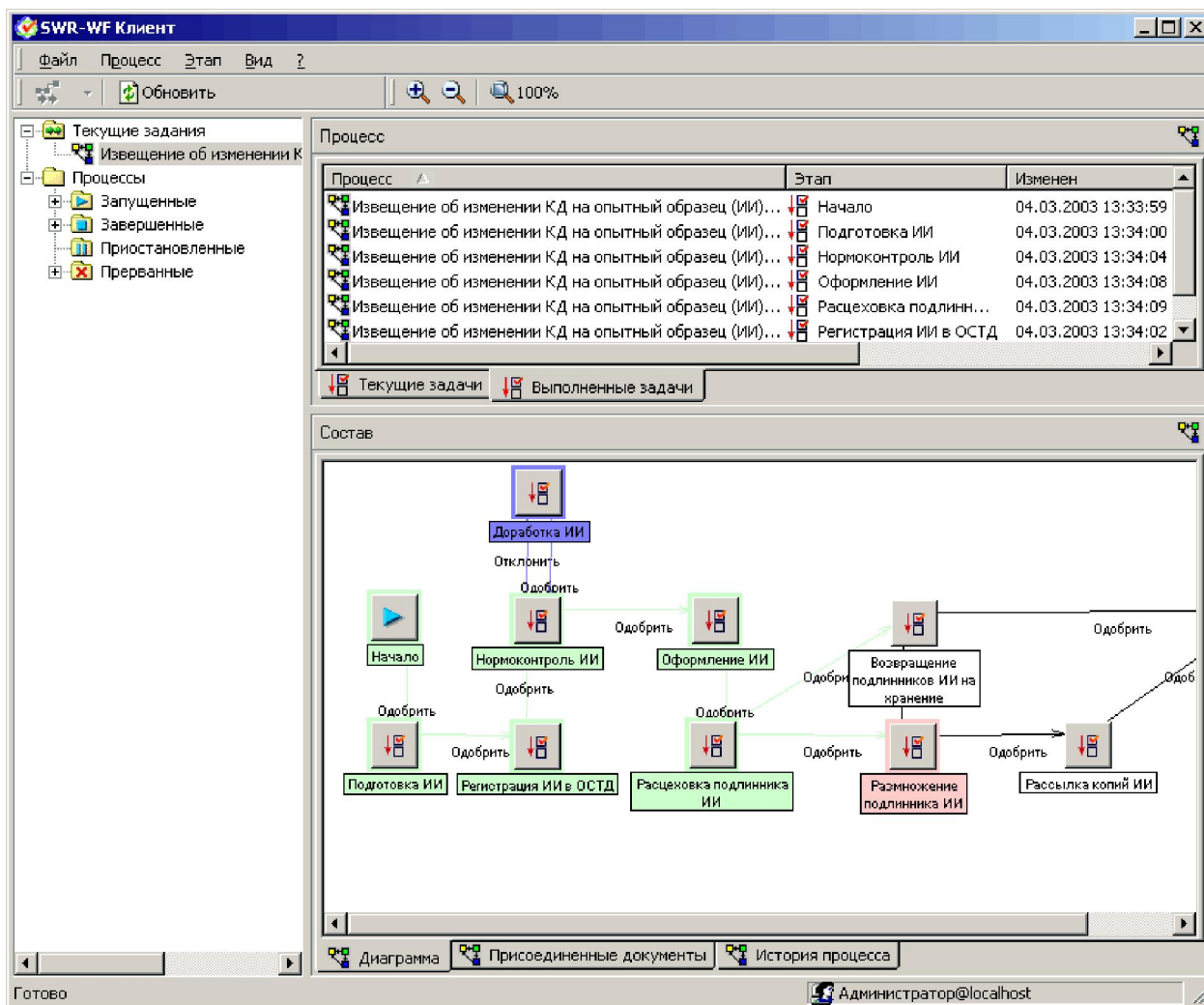


Рис.2 Діаграма проходження проекту в системі SWR-Workflow

Формування списку завдань для кожного учасника проекту виконується за допомогою відповідної підсистеми. При цьому кожен учасник отримує особистий електронний поштовий ящик. В цей ящик поступають адресовані йому повідомлення. Основним типом повідомлень є інформація щодо завершення попередніх етапів проходження проекту та необхідність виконання етапу, на якому потрібна безпосередня участь даного користувача. За допомогою поштового ящика реалізується виконання задач, перегляд їх результатів, формування згоди щодо виконання робіт наступного підетапу.

З метою узгодження та затвердження документів система веде електронні картки підписів. При виконанні змін в раніше затверджених документах надсилається повідомлення про зміни, яке також затверджується.

В цілому інтеграція системи в комплекс CAD/CAE/CAM/TDM/PDM/Workflow розширює поняття прав доступу до документів – вводиться термін ролі учасника проекту. Тут роль учасника проекту визначає перелік дій, які він повинен виконувати над тими документами, що утворюють проект.

При використанні систем подібного класу сут-

тево зростає роль принципу оптимального зв'язку проектувальника з ЕОМ. Відповідно до його реалізації нові системи підтримують методи об'єктно-орієнтованої технології, коли в залежності від обраної конструктором попередньої команди на дисплей подається меню лише тих команд, котрі необхідні для виконання наступного кроку робіт. Вказані системи, крім цього, підтримують роботу з "інтелектуальними" об'єктами, які супроводжуються інформацією щодо вибору матеріалу, допусків, технології виготовлення тощо [10].

Майбутнє, яке практично вже настало, потребує інтеграції до системи ІІТ систем промислового проектування та створення інтегрованого середовища віртуальної розробки, або автоматизації інженерного забезпечення (AIZ, VDE). В такому середовищі формуються не тільки моделі деталей, що проектуються, а й здійснюється проектування цехів для виготовлення цих деталей. Іншим кроком на шляху підвищення ефективності стадії розробки є створення, так званої, віртуальної компанії (VC), коли фірма проектувальник двигунів працює з фірмами постачальниками та замовниками в середовищі сумісних комп'ютерних програм [11].

Стадія виробництва з використанням комп'ютерних технологій передбачає наявність класичних систем управління підприємством (АСУП), автоматизації технологічних процесів на підприємстві (АСУПТ) та використання гнучких виробничих систем (ГВС). На сьогодні сукупність автоматизованих систем стадій розробки і виробництва залучаються до загальної виробничої системи, або комп'ютерно-інтегрованого виробництва (КІВ), з урахуванням спільного ефекту від використання КІВ в цілому [12,13].

Спрямування – це частина життєвого циклу, яка передуює експлуатації. Вона складається з етапів реклами, консервації, зберігання, транспортування, монтажу. Для двигунів різних типів та призначення зміст і вага цих етапів може суттєво відрізнятися, але головним завжди залишається етап монтажу. При цьому усі перераховані етапи в основному направлені на забезпечення подальшої ефективної роботи конструкції і гарантованого строку її служби.

На стадії експлуатації реалізується, підтримується та поновлюється якість машин. Експлуатація в загальному випадку складається з етапів введення в експлуатацію, використання конструкції за призначенням, технічного обслуговування, зберігання, ремонту, модернізації. Кожен з цих етапів направлено на досягнення високих техніко-економічних показників роботи двигуна, забезпечення і підвищення строку його служби. Завершується ця стадія зняттям технічного об'єкту з експлуатації внаслідок фізичного або морального його зносу та утилізацією. Зрозуміло, що найбільш вагомим тут є етап використання. Цей основний етап стадії експлуатації водночас являється головним етапом ЖЦК. Саме на його ефек-

тивну реалізацію націлюють усі інші етапи. З цього приводу на стадії експлуатації доцільним вважається впровадження автоматизованої системи статистичних досліджень (АССД). Результати цих досліджень використовують на попередніх етапах ЖЦК.

Важливо відзначити, що зростання темпів науково-технічного прогресу, жорстка конкуренція між фірмами-виробниками двигунів приводить до суттєвого прискорення морального зносу об'єктів проектування. З цієї причини підвищення якості ДВЗ розглядають як обов'язкову умову уповільнення темпу морального зносу і розширення етапу сталого виробництва двигунів. Сучасними шляхами підвищення якості продукції, зменшення витрат на її проектування, виробництво і експлуатацію є комплексне використання межсистемного обміну даними та безперервна інформаційна підтримка життєвого циклу конструкції, що об'єднані під назвою CALS-технології (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Задача CALS-технології – впровадження єдиного інформаційного середовища для усіх етапів життєвого циклу конструкції. В основу її практичного розв'язання покладено моделі електронного вигляду даних щодо об'єктів проектування, технологічних процесів, виробничого середовища, правила обміну цими даними. Іншими словами CALS-технологія – це етап розвитку комп'ютерних технологій, коли інтегровані автоматизовані системи виконання проектних робіт, управління технологічними процесами і підприємствами об'єднуються в єдиному інформаційному просторі.

Широка інформаційна інтеграція систем машинобудівного профілю, безумовно, вимагає дотримання відповідних стандартів. І такі стандарти вже розроблені і надалі розробляються. Характерним прикладом тут є стандарти серії ІСО 10303 STEP. Наприклад, стандарт ІСО 10303-214 визначає інформацію, яка пов'язана з підетапами конструювання (дані щодо форми, розмірів, допусків на виготовлення, опису кінематичних структур, ідентифікації стандартних елементів тощо). В його створенні приймали участь фірми Audi, Volkswagen, Volvo, Honda, Toyota, Mitsubishi, Ford, General Motors, Renault та інші.

В світі створені національні організації по розвитку CALS. Так спільний проект AUSAP дев'ятнадцяти фірм автомобільної галузі Австралії має за мету забезпечення конкурентоспроможності своєї продукції після 2010 р., тобто після запланованої відміни мита на імпорт.

В цілому, за оцінками американських спеціалістів, CALS-технологія дозволяє на 40-60% скоротити об'єми науково-дослідних і конструкторських робіт, на 30% - витрати в сферах виробництва і експлуатації при одночасному підвищенні якості складних технічних систем [11].

Таким чином, нові інформаційні технології на сьогодні забезпечують інформаційну узгодженість

більшості етапів життєвого циклу конструкції. Водночас, повертаючись до рис.1 можна побачити, що в існуючих системах ЖЦК ДВЗ відсутня інтеграція сукупності автоматизованих систем КІВ з системами стадії науково-технічного пошуку. Покажемо необхідність інтеграції АСНД/САПР і АСНД/КІВ в цілому та сформулюємо комплекс задач, що потребують свого розв'язання з метою подальшого підвищення ефективності функціонування САПР і КІВ.

Практичну задачу проектування двигуна чи його певної деталі можна записати у вигляді [8,14]:

$$f(x, \xi_i) \leftarrow \mu_x \xi_i, \quad f \subset F, \quad (1)$$

$$x \in X \subset E^k, \quad \xi_i \in \Xi \subset \Psi, \quad i = 1, 2, \dots, j$$

де F – множина значень показників роботи двигуна та певної деталі, що проектується; f – множина обраних для проектування деталі двигуна критеріїв його якості, $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$; X – множина можливих варіантів конкуруючих конструкцій деталі; E^k – декартовий простір розмірності k ; x – вектор опису конструктивних та технологічних параметрів деталі, $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, $m \leq k$; Ψ – множина можливих експлуатаційних режимів роботи двигуна; Ξ – модель експлуатації двигуна певного призначення, $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j\}$; ξ_i , $i = 1, 2, \dots, j$ – представницькі режими роботи двигуна у вибраній моделі експлуатації; μ_x – множина відповідних до f математичних моделей функціонування двигуна, $\mu_x = \{\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}\}$.

При цьому різні аспекти розгляду складної технічної системи та її підсистем передбачають застосування декомпозиції описів щодо властивостей об'єкта проектування. Така декомпозиція приводить до появи функціонального, конструкторського та технологічного описів. Розв'язання задач, що пов'язані з отриманням та використанням вказаних описів, називають відповідно функціональним, конструкторським та технологічним проектуванням.

Функціональний аспект проектування надає уявлення щодо прояву властивостей системи в процесі виконання тих дій, для яких вона призначена. Обов'язковим тут є урахування зовнішнього впливу на систему. При цьому функціональний аспект розподіляється на внутрішній та зовнішній описи системи. Повертаючись до виразу (1) видно, що множина μ_x математичних моделей функціонування двигуна є внутрішнім функціональним його описом, а множина критеріїв $f(x, \xi_i)$ – зовнішнім описом. Параметр ξ_i відповідає наявності зовнішнього впливу на систему.

Конструкторський аспект проектування повинен визначати конфігурацію і розміри деталей, їх взаємне розташування в просторі, інші проектні відомості. Цей опис виконують у вигляді тривимірних моделей, креслень, словесних документів. Технологічний аспект проектування передбачає опис мето-

дів, способів і засобів виготовлення об'єкту проектування. Необхідність залучення технологічних описів до загального кола аспектів проектування двигуна очевидна – в більшості випадків на зовнішній функціональний опис $f(x, \xi_i)$ технологічний опис впливає нарівні з конструкторським. Саме тому вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ в (1) означено як опис конструктивних та технологічних параметрів. З цього приводу проектування визначають як процес, що полягає в перетворенні вхідного опису x^0 цільової системи в остаточний її опис x^{onm} , який відповідатиме найкращий композиції часткових критеріїв якості

$$f^{onm} = (f_1(x^{onm}, \xi_i), f_2(x^{onm}, \xi_i), \dots, f_n(x^{onm}, \xi_i)) \quad (2)$$

з урахуванням впливу моделі експлуатації $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j\}$ на систему.

З урахуванням поданого при досягненні основних цілей підтримки ЖЦК виникає проблема підвищення ефективності віртуального перетворення вхідних описів двигуна x^0 в сукупність його остаточних описів x^{onm} шляхом використання набору внутрішніх описів μ_x та врахування зовнішніх впливів Ξ . Критерієм якості конструкції при цьому виступає вектор зовнішнього функціонального опису, який можна сформулювати у вигляді технічного завдання f^{T3} :

$$f^{T3} \leq (f^{onm} | x = x^{onm}; \xi_i \in \Xi) \rightarrow \max, i = 1, 2, \dots, j. \quad (3)$$

Тут x – структурна математична модель двигуна та його деталей. Тоді під зовнішнім проектуванням в АСНД можна розуміти формування структурної математичної моделі x та зовнішнього функціонального опису f^{T3} .

Іншими задачами АСНД (окрім формулювання зовнішнього функціонального опису), які встановлюють прямі зв'язки між АСНД та КІВ за [1] в загальному вигляді є наступні:

1. Формулювання можливих наукових, технічних, економічних, організаційних проблем, що виникають в процесі підтримки ЖЦК.
2. Пошук варіантів розв'язання сформульованих проблем.

При цьому формулювання можливих проблем здійснюється на основі досвіду виконавців і експертів проекту шляхом аналізу отриманих результатів для однотипних задач, існуючих методів проходження етапів ЖЦК, недоліків використання результатів й методів тощо.

1. Розробка і призначення складових векторного критерію якості об'єкта проектування і його елементів $f = (f_1, f_2, \dots, f_n); f \subset F$.

2. Розширення множини X конкуруючих конструкцій елементів двигунів, розробка і впровадження досконалих структурних математичних моделей опису усіх елементів $x = (x_1, x_2, \dots, x_m), x \in X$.

3. Обґрунтування економічної достовірної теоретичної моделі експлуатації Ξ , призначеної для розробки двигунів певного технологічного призначення.

4. Розробка комплексів еквівалентних функціо-

нальних математичних моделей $\mu_x = \{\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}\}$ різних рівнів складності, що в сукупності відповідають досягненню вимог універсальності, економічності, точності, адекватності.

5. Розробка та обґрунтування ефективних маршрутів проектування елементів двигунів.

Важливо підкреслити, що інтеграція окремих автоматизованих систем в єдиному комплексі обов'язково передбачає початок роботи певної наступної системи ще до завершення робіт попередньої [12,15]. Це означає, що інтеграція АСНД/КІВ повинна передбачати одночасну роботу АСНД та КІВ, з передачею в КІВ (на основі використання VC- та CALS-технологій) нових результатів розв'язання перерахованих вище задач функціонування АСНД.

Вагомість вказаного проілюструємо на прикладі розв'язання задачі забезпечення адекватності використання функціональної математичної моделі μ_{x_k} прогнозування критерію якості f_k в області застосування моделі експлуатації Ξ . На рис.3 подано можливу схему проходження проекту двигуна в САПР. Видно, що обрана модель експлуатації (блок 14) використовується в більшості інших блоків системи – 1, 3, 4-9, 13. При цьому процес проектування закладено ітераційний, а ефективність САПР буде тим вищою, чим менше здійснюється повернень до певних попередніх блоків після проведення випробувань (блок 13).

На основі застосування в КІВ віртуальних підходів (1)-(3) можна конкретизувати ці задачі:

Вимога зменшення кількості ітераційних повернень на початковій підетапі проектування після підетапу випробувань обов'язково визначається областю адекватності математичної моделі,

$$A(\mu_{x_k}) = \{x | \varepsilon_{\max} \leq \delta; \xi_i | \varepsilon_{\max} \leq \delta; z | \varepsilon_{\max} \leq \delta\}, \quad (4)$$

$$x \in X, \xi_i \in \Xi, z \in Z$$

де ε_{\max} – максимальна отримана похибка моделі; δ – наперед задана припустима похибка моделі; z – вектор внутрішніх параметрів моделі, обраний з множини цих параметрів Z .

Тут для моделі μ_{x_k} її адекватність забезпечується корегуванням значень складових вектору Z з метою досягнення умови

$$\varepsilon_{\max} \leq \delta. \quad (5)$$

Важливо, що в разі порушення умови (5) для множини конструкцій x та умов експлуатації Ξ забезпечення вимоги (4) стає неекономічною компромісною задачею САПР вигляду

$$\varepsilon_{\max_i} \rightarrow \min, \xi_i \in \Xi, i = 1, 2, \dots, j. \quad (6)$$

Для ефективного розв'язання задачі (6) існує можливість згортки складових $f_{k_i} = \varepsilon_{\max_i}$ якості f_k моделі μ_{x_k} до скалярного вигляду на основі використання функції бажаності Харрінгтона [16]:

$$D_k(j) = \sqrt[j]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_j}, \quad (7)$$

$$d_i = \exp[-\exp(-a_0 - a_1 f_{k_i})], \quad i = 1, 2, \dots, j. \quad (8)$$

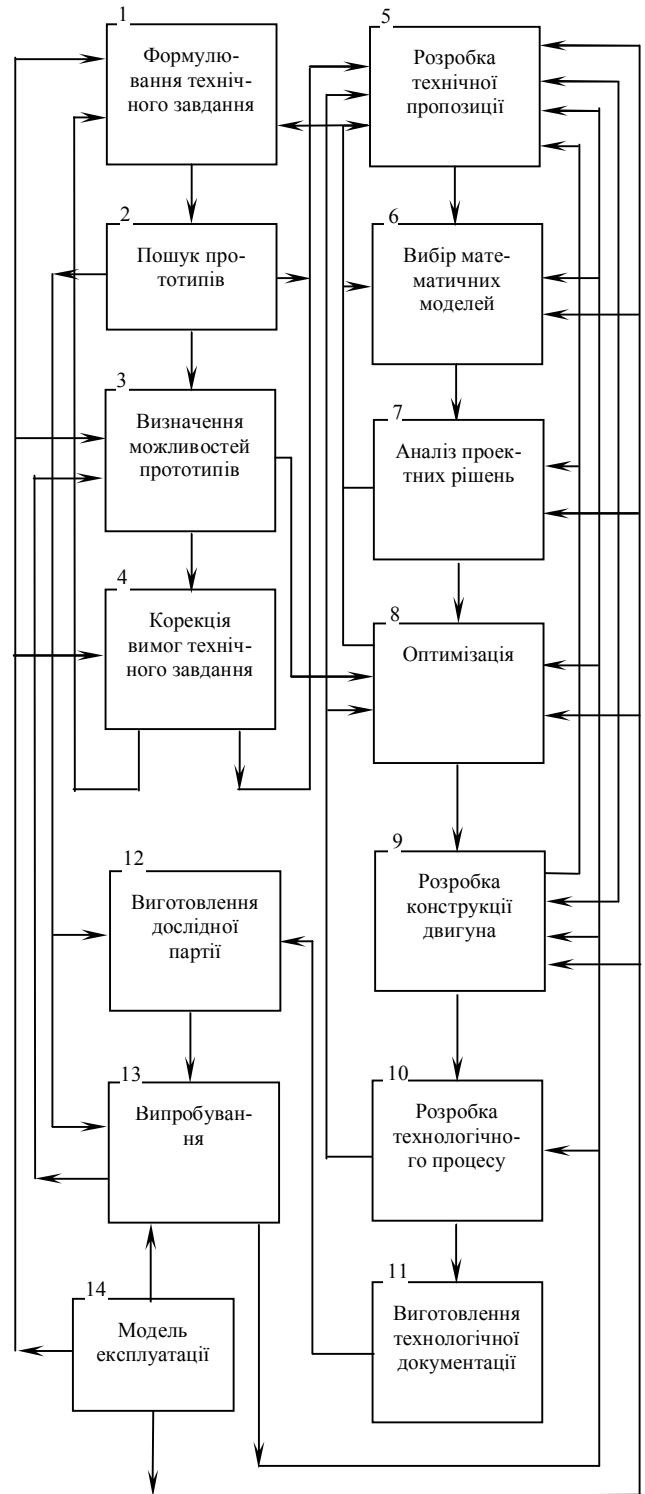


Рис. 3. Загальна схема процесу автоматизованого проектування ДВС

При цьому використання класичного виразу (8) здійснюється на основі визначення коефіцієнтів a_0 і a_1 за умов встановлення відповідності між деякими значеннями часткових критеріїв якості f_k і частковими функціями бажаності d_i з урахуванням класичної шкали, що подана в табл.1.

Таблиця 1. Базові оцінки шкал бажаності критеріїв якості

Якісна оцінка бажаності критерію f_k	Кількісне значення критерію бажаності d_i за класичною шкалою	Кількісне значення критерію бажаності d_i за новою шкалою
Дуже добре	1,0 – 0,8	1,0 – 0,8
Добре	0,8 – 0,63	0,8 – 0,63
Задовільно	0,63 – 0,37	0,63 – 0,2
Погано	0,37 – 0,2	0,2 – $1 \cdot 10^{-7}$
Дуже погано	0,2 – 0,0	$1 \cdot 10^{-7}$ – 0,0

Скористаємось методикою (7), (8) та даними табл.1 для визначення рівня адекватності математичної моделі прогнозування температурного стану поршня з напіввідкритою камерою згорання щодо трьох моделей експлуатації тракторного дизеля 4ЧН12/14. Будемо вважати, що усі моделі і дані передано з САПР в АСНД.

Обрані для прикладу моделі експлуатації узяті з [17], температурний стан поршня встановлено в [14]. Коефіцієнти a_0 і a_1 визначались на основі співвідношень, що подані в табл.2 (виділені шрифтом). Вихідні дані для розрахунків та результати використання моделі (7), (8) наведено в табл.3-5. Тут $\bar{M}_{кр i}$, \bar{n}_i – відносні від номінальних значень $M_{кр ном}$, $n_{ном}$ величини крутного моменту та частоти обертання колінчастого вала при роботі двигуна на i -му експлуатаційному режимі; $t_i^{експ}$, $t_i^{розр}$ – відповідно, експериментальні та розрахункові значення температур. Визначену узагальнену бажаність як чисельну оцінку рівня адекватності моделі μ_{x_k} позначено

$D'_k(18)$. З отриманих результатів видно, що усі з розглянутих моделей експлуатації відповідають області адекватності функціональної математичної моделі

$$D_k(j) = \{x | \varepsilon_{\max} \leq \delta; \xi_i | \varepsilon_{\max} \leq \delta; z | \varepsilon_{\max} \leq \delta\} \rightarrow 1$$

, $x \in X$, $\xi_i \in \Xi$, $z \in Z$, (9)

з кількісною оцінкою якості не нижче ніж „задовільно” ($D'_k(18) > 0,37$, див. табл.3). При цьому зрозуміло, що використання методики (6) у вигляді (9) проти методики (5) дозволяє здійснювати оптимізацію внутрішніх параметрів Z з метою досягнення умови (9) та, відповідно, (5). Водночас слід підкреслити, що знаходження оптимального значення z^{opt} при $D_k^{opt} < 1$ не є достатнім для забезпечення умови (5). Це добре видно з табл.3 (режим $i = 1$), де має місце

похибка визначення температури 11,4%, що виходить за межі адекватності моделі та відповідає рівню її якості „дуже погано” ($d_i = 0,97 \cdot 10^{-5}$). Таким чином, підходи (5) і (9) не є еквівалентними.

Таблиця 2. Співвідношення між похибкою визначення температури і бажаністю похибки при $\delta = 5,5\%$ за класичною шкалою

$f_k = \varepsilon_{\max}, \%$	d'_i	$D'_k(10)$	$D'_k(30)$
0	1	1	1
2,5	0,8	0,98	0,99
3,5	0,63	0,96	0,98
4,45	0,37	0,9	0,97
5	0,26	0,87	0,96
6	0,11	0,8	0,93
7	0,039	0,72	0,90
10	0,00027	0,44	0,76
12	0,0000019	0,27	0,64

Повернемось до розгляду табл.2. Тут подано результати обчислень узагальненої функції $D'_k(j)$ щодо вартого уваги теоретичного випадку, коли значення d'_i знаходиться відповідно до виразу (8) за поданими в табл.2 значеннями $f_k = \varepsilon_{\max}$, а інші часткові функції $d'_i = 1, i = 2, 3, \dots, j$. З таблиці видно, що при $\varepsilon_{\max} = 6\%$ узагальнена бажаність навіть моделі $D'_k(10)$ дорівнює значенню 0,8, тобто якнайменше відповідає рівню „добре”. Це означає, що при використанні методики (7), (8), (9) необхідно мати спеціальну, нову шкалу відповідності між значеннями часткових критеріїв якості f_k і частковими функціями бажаності d_i . З табл.2 також видно, що навіть при $\varepsilon_{\max} = 12\%$ величина $D'_k(30) = 0,64$ є вкрай високою. Останнє вимагає використання іншої, більш достовірної, ніж (8), функції перетворення часткових критеріїв якості f_k до вигляду часткових критеріїв бажаності моделі d_i . Запропонована нами нова шкала відповідності між f_{k_i} і d_i подана в табл.1. Нова функція зв'язку критеріїв f_k і d_i може мати загальний вигляд:

$$d_i = \frac{b_0 - b_1 \varepsilon_i^2 + |b_0 - b_1 \varepsilon_i^2|}{2}. \quad (10)$$

Визначення коефіцієнтів b_0 і b_1 нами здійснено за виділеними шрифтом співвідношеннями табл.6 (аналогічно до визначення коефіцієнтів a_0 і a_1 на основі табл.2). З табл.6 видно, що вище розглянуті за даними табл.2 недоліки усунуто.

Результати використання розробленої методики (7), (9), (10) подано в табл.3-5 у вигляді узагальненої функції бажаності $D'_k(18)$. З таблиць видно, що поставлену задачу розв'язано. Її результати необхідно передавати в САПР незалежно від стадії проходження проекту і прийнятої моделі експлуатації двигуна. Тут паралельна робота АСНД і САПР суттєво підвищує ефективність проходження проектів.

Таблиця 3. Оцінка адекватності прогнозування температурного стану поршня дизеля 4ЧН12/14 в умовах експлуатації трактора категорії 2, $N_{e\text{ном}}=77,2$ кВт, $M_{кр\text{ном}}=338$ нМ, $n_{\text{ном}}=1900$ хв⁻¹

Режим i	$\bar{M}_{крi}$	\bar{n}_i	$t_i^{експ}, ^\circ\text{C}$	$t_i^{позп}, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_{\text{max}i}, \%$	d'_i	d''_i
1	0,1	0,825	193	215	11,4	0,0000097	0
2	0,1	0,975	216	217	0,5	0,99	0,99
3	0,1	1,075	240	242	0,8	0,99	0,98
4	0,3	0,825	224	236	5,4	0,19	0,07
5	0,3	0,975	240	242	0,8	0,98	0,98
6	0,3	1,05	250	244	2,4	0,78	0,82
7	0,5	0,825	252	257	2,0	0,88	0,87
8	0,5	0,95	263	265	0,8	0,99	0,98
9	0,5	1,025	276	270	2,2	0,85	0,85
10	0,7	0,825	272	279	2,6	0,78	0,78
11	0,7	0,95	289	291	0,7	0,99	0,98
12	0,7	1,025	301	298	1,0	0,98	0,97
13	0,9	0,825	308	301	2,3	0,83	0,83
14	0,9	0,95	316	316	0,0	1,00	1,00
15	0,9	1,0	325	323	0,6	0,99	0,99
16	1,1	0,825	342	324	5,3	0,21	0,10
17	1,1	0,95	352	343	2,6	0,78	0,78
18	1,15	0,825	348	33	0,8	0,99	0,98
						$D'_k(18)=0,41$	$D''_k(18)=0$

Таблиця 4. Оцінка адекватності прогнозування температурного стану поршня дизеля 4ЧН12/14 в умовах експлуатації трактора категорії 3, $N_{e\text{ном}}=92$ кВт, $M_{кр\text{ном}}=462$ нМ, $n_{\text{ном}}=1900$ хв⁻¹

Режим i	$\bar{M}_{крi}$	\bar{n}_i	$t_i^{експ}, ^\circ\text{C}$	$t_i^{позп}, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_{\text{max}i}, \%$	d'_i	d''_i
1	0,1	0,825	195	199	2,1	0,87	0,86
2	0,1	0,975	210	202	3,8	0,52	0,54
3	0,1	1,075	211	203	3,8	0,52	0,54
4	0,3	0,825	225	225	0	1,00	1,00
5	0,3	0,975	240	232	3,3	0,63	0,65
6	0,3	1,05	245	235	4,1	0,45	0,46
7	0,5	0,825	255	251	1,6	0,93	0,92
8	0,5	0,95	274	261	4,7	0,32	0,29
9	0,5	1,025	273	267	2,2	0,85	0,85
10	0,7	0,825	286	278	2,8	0,74	0,75
11	0,7	0,95	295	292	1,0	0,98	0,97
12	0,7	1,025	305	300	1,6	0,93	0,92
13	0,9	0,825	317	305	3,8	0,52	0,54
14	0,9	0,95	325	323	0,6	0,99	0,99
15	0,9	1,0	337	331	1,8	0,91	0,90
16	1,1	0,825	349	332	4,9	0,28	0,23
17	1,1	0,95	349	332	4,9	0,28	0,23
18	1,15	0,825	355	339	4,5	0,36	0,35
						$D'_k(18)=0,61$	$D''_k(18)=0,60$

Слід звернути увагу також на наступну вагому задачу, що стоїть в процесі функціонування АСНД ДВЗ – розробку достовірних економічних теоретичних моделей експлуатації двигунів Ξ . Коли недостовірною є вказана модель, то недоліки конструкції можуть бути не виявлені під час випробувань в блоці 13 за рис.3, а з'ясовані тільки безпосередньо в процесі експлуатації, тобто в блоці АССД за рис.1. Нажаль, приклади таких помилок в світовій практиці двигунобудування мають місце дотепер.

Висновки та напрям подальших досліджень

1. Висвітлено загальні тенденції розвитку комп'ютерних технологій підтримки життєвого циклу ДВЗ. Показано необхідність інтеграції етапів функціонування АСНД ДВЗ та КІВ ДВЗ в єдиному комплексі проходження проектів двигунів.

2. Сформульовано загальні задачі, що потребують свого розв'язання в процесі функціонування комплексу АСНД/КІВ ДВЗ.

3. Розроблено нову методику оцінки рівня адекватності функціональної математичної моделі з урахуванням моделі експлуатації двигуна. Наведено приклад сумісного функціонування комплексу АСНД/САПР ДВЗ щодо розв'язання задачі оцінки рівня адекватності функціональної математичної моделі.

Подальший напрямок робіт націлено на розробку в АСНД методики генерації економічних достовірних теоретичних моделей функціонування двигунів внутрішнього згоряння різного технологічного призначення.

Таблица 5. Оцінка адекватності прогнозування температурного стану поршня дизеля 4СН12/14 в умовах експлуатації трактора категорії 3, $N_{e\text{ном}}=106,7$ кВт, $M_{кр\text{ном}}=509$ нМ, $n_{\text{ном}}=2000$ хв⁻¹

Режим i	$\bar{M}_{крi}$	\bar{n}_i	$t_i^{\text{експ}}, ^\circ\text{C}$	$t_i^{\text{позр}}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\text{max}i}, \%$	d'_i	d''_i
1	0,1	0,825	201	201	0,0	1,00	1,00
2	0,1	0,975	208	204	1,9	0,89	0,88
3	0,1	1,075	207	206	0,48	0,99	0,99
4	0,3	0,825	233	231	0,86	0,99	0,98
5	0,3	0,975	243	239	1,6	0,93	0,92
6	0,3	1,05	245	243	0,8	0,99	0,98
7	0,5	0,825	267	262	1,9	0,89	0,88
8	0,5	0,95	279	273	2,2	0,85	0,85
9	0,5	1,025	280	280	0,0	1,00	1,00
10	0,7	0,825	300	293	2,3	0,84	0,83
11	0,7	0,95	316	309	2,2	0,85	0,85
12	0,7	1,025	317	320	0,9	0,98	0,97
13	0,9	0,825	334	324	3,0	0,70	0,71
14	0,9	0,95	353	346	2,0	0,88	0,87
15	0,9	1,0	352	355	0,85	0,99	0,98
16	1,1	0,825	368	357	3,0	0,70	0,71
17	1,1	0,95	388	384	1,0	0,98	0,97
18	1,15	0,825	376	365	2,9	0,72	0,73
						$D'_k(18)=0,89$	$D''_k(18)=0,88$

Таблица 6. Співвідношення між похибкою визначення температури і бажаністю похибки при $\delta = 5,5\%$ за новою шкалою

$f_{k_i} = \varepsilon_{\text{max}i}, \%$	d''_i	$D''_k(10)$	$D''_k(30)$
0	1	1	1
2,5	0,8	0,98	0,99
3,5	0,63	0,96	0,98
4,45	0,37	0,9	0,97
5	0,2	0,85	0,95
6	0,0	0,0	0,0

Список літератури:

1. Разработка САПР. В 10-ти кн. Кн.1. Проблемы и принципы создания САПР / А.В. Петров, В.М. Черненко / Под ред. А.В. Петрова. – М.: Высш. шк., 1990. – 143 с. 2. САПР: Системы автоматизированного проектирования: В 9 кн. Кн.1. Принципы построения и структура / И.П. Норенков. – Минск: Высш. шк., 1987. – 123 с. 3. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / И.П. Ксеневиц, В.В. Гуськов, Н.Ф. Бочаров, Ю.Е. Атаманов и др. / Под общ. ред. И.П. Ксеневица. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с. 4. Flynn P.F. Pursuing customer satisfaction – An abridged technical history of Cummins engine development / Gas Turbines and Power. – 1999. – №2. – P.177-185. 5. Различие приоритетов проектирования автомобилей в Европе и США (обзор докладов SAE 2000) // Автостроение за рубежом. – 2001. – №1. – С.3-6. 6. Новая конструк-

ция ДВС фирмы SAAB // Автостроение за рубежом. – 2001. – №2. – С.10-11. 7. Планы дизелизации автомобилей Ford // Автостроение за рубежом. – 2001. – №2. – С.18. 8. Краснощекоев П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: МГУ, 1983. – 156 с. 9. Петров Р.Л.. Виртуальный мир создает автомобили // Автомобильная промышленность. – 1997. – №10. – С. 4-5. 10. Современные тенденции автоматизированного проектирования в автостроении // Автостроение за рубежом. – 2001. – №2. – С. 15-17. 11. Блинов А.Д., Папонов В.С. Научно-техническая политика ведущих автомобилестроительных фирм // Автомобильная промышленность. – 2001. – №2. – С.38-39. 12. Энгельке У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП: Управление и технология: Пер. с англ. / Под ред. Д.А. Корягина. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с. 13. Быков А. Желанное и действительное в геометрическом моделировании // САПР и графика. – 2002. – №1. – С.15-20. 14. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності. – Харків: Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 2001. – 332 с. 15. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 246 с. 16. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко / Под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Тэхніка, 1984. – 200 с. 17. Ажиппо Н.А., Балюк Б.К. Прогнозирование долговечности подшипников скольжения тракторных двигателей на стадии их проектирования // Двигателестроение. – 1985. – №8. – С. 17-20.