

ФОРМУВАННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБУ НА СТАДІЇ СТВОРЕННЯ ЙОГО ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

¹Я. М. Кусий*, ¹В. В. Ступницький, ¹Я. М. Литвиняк, ¹С. М. Ментинський, ²В. Г. Панчук

¹Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12;
e-mail: j a r k u m @ u k r . n e t

²ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: v . p a n c h u k @ n u n g . e d u . u a

Встановлено пріоритетність досліджень сучасних інформаційних систем керування технологічними процесами виготовлення виробів та впровадження їх у практику машинобудівних підприємств. Описано об'єктно-орієнтований і функціонально-орієнтований принципи проектування технологічних процесів при виготовленні деталей машин і область їх ефективного використання. Проаналізовано алгоритми формування вихідних параметрів виробів при реалізації об'єктно-орієнтованого і функціонально-орієнтованого принципів проектування технологічних процесів. Наведено узагальнений алгоритм функціонування САФ-системи у структурі інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Проаналізовано умови формування параметрів виробів із врахуванням впливу інтегрованої підсистеми конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та технологічної підсистеми „верстат-присрій-інструмент-заготовка”. Сформульовано основні положення системного підходу при дослідженні формування вихідних параметрів виробів на стадії їх створення у життєвих циклах при реалізації функціонально-орієнтованих принципів проектування. Проаналізовано умови реалізації фізичних процесів з позиції синергетичного підходу у дослідженні технічних систем. Розроблено математичну модель для прогнозування ймовірності формоутворення заготовки деталі без браку на стадії її створення при реалізації технологічного процесу виготовлення виробу. Наведено множинну розв'язків математичної моделі, що визначають ступінь впливу технологічних підсистем на забезпечення вихідних параметрів виробу. За допомогою синергетичного підходу розглянуто процес формування вихідних параметрів виробу як результат взаємодії інтегрованої підсистеми конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та технологічної підсистеми „верстат-присрій-інструмент-заготовка” із забезпеченням контролю параметрів якості виробу за допомогою САФ-підсистеми і підсистеми реалізації контрольних операцій. Подальші дослідження будуть стосуватися розробленню алгоритмів визначення розв'язків математичної моделі при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей машин із використанням функціонально-орієнтованого принципу проектування при забезпеченні регламентованих показників якості їх виконавчих поверхонь.

Ключові слова: життєвий цикл виробу; стадія створення виробу; технологічний процес; технологічна підготовка виробництва; функціонально-орієнтований принцип; система формоутворення.

Установлена пріоритетность исследований современных информационных систем управления технологическими процессами изготовления изделий и внедрение их в практику машиностроительных предприятий. Описаны объектно-ориентированный и функционально-ориентированный принципы проектирования технологических процессов при изготовлении деталей машин и область их эффективного использования. Проанализированы алгоритмы формирования исходных параметров изделий при реализации объектно-ориентированного и функционально-ориентированного принципов проектирования технологических процессов. Приведен обобщенный алгоритм функционирования САФ-системы в структуре интегрированной конструкторско-технологической подготовки производства. Проанализированы условия формирования параметров изделий с учетом влияния интегрированной подсистемы конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства и технологической подсистемы „станок-приспособление-инструмент-заготовка”. Сформулированы основные положения системного подхода при исследовании формирования выходных параметров изделий на стадии их создания в жизненных циклах при реализации функционально-ориентированных принципов проектирования. Проанализированы условия реализации физических процессов с позиции синергетического подхода в исследовании технических систем. Разработана математическая модель для прогнозирования вероятности формообразования заготовки детали без брака на стадии ее создания при реализации технологического процесса изготовления изделия. Приведены множественно решений математической модели, определяющие степень влияния технологических подсистем на обеспечение выходных параметров изделия. С помощью синергетического подхода рассмотрен процесс формирования исходных параметров изделия как результат взаимодействия интегрированной подсистемы

конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства и технологической подсистемы „станок устройство-инструмент-заготовка” с обеспечением контроля параметров качества изделия с помощью САФ-подсистемы и подсистемы реализации контрольных операций. Дальнейшие исследования будут касаться разработки алгоритмов определения решений математической модели при проектировании технологических процессов изготовления деталей машин с использованием функционально-ориентированного принципа проектирования при обеспечении регламентированных показателей качества их исполнительных поверхностей.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия; стадия создания изделия; технологический процесс; технологическая подготовка производства; функционально-ориентированный принцип; система формообразования.

The priority of research into modern information systems for controlling technological processes of product manufacturing and their introduction into the practice of machine-building enterprises is established. Described the object-oriented and functionally-oriented principles of designing technological processes in the manufacture of machine parts and the area of their effective use. Algorithms of initial product parameters formation when implementing object-oriented and function-oriented principles of technological processes design are analyzed. A generalized algorithm of a CAF-system functioning in the structure of an integrated design-engineering reproduction is presented. The conditions of shaping product parameters taking into account the influence of an integrated subsystem of design-engineering preparation of machine-building production and technological subsystems: machine, fixture, tool, workpiece are analyzed. The main provisions of the system approach to the study of the formation of the output parameters of products at the stage of their creation in life cycles during the implementation of function-oriented design principles are formulated. The conditions for the realization of physical processes from the position of the synergetic approach in the study of technical systems are analyzed. A mathematical model for predicting the probability of forming a workpiece blank without defects at the stage of its creation during the implementation of the technological process of product manufacturing was developed. Numerous solutions of the mathematical model are given, which determine the degree of influence of technological subsystems on ensuring output parameters of the product. Using a synergetic approach, the process of forming the initial parameters of the product as a result of interaction between the integrated subsystem of design-engineering preparation of engineering production and technological subsystems: machine, device, tool, workpiece with the provision of quality control parameters of the product using the CAF subsystem and a subsystem of implementation of control operations. Further research will concern the development of algorithms for determining the solutions of mathematical models when designing technological processes for the manufacture of machine parts using a function-oriented design principle while ensuring the regulated quality parameters of their executive surfaces.

Keywords: product life cycle; product development stage; technological process; technological preparation of production; function-oriented principle; forming system.

Вступ

Розроблення та впровадження у виробничу практику машинобудівних підприємств інтегрованих інформаційних систем керування технологічними процесами виготовлення виробів є головним рушієм економічного зростання промислово розвинутих країн світу [1, 2].

У традиційних автоматизованих системах технологічної підготовки машинобудівного виробництва реалізується об'єктно-орієнтований принцип проектування технологічних процесів, що передбачає покрокове виконання взаємопов'язаних етапів на основі алгоритму прототипування [3-5]. Основним завданням при цьому є забезпечення параметрів якості продукції на стадії створення виробу його життєвого циклу за рахунок досягнення лише необхідних вимог конструкторсько-технологічної документації. У цьому випадку критерієм оптимізації при виборі раціонального варіанту технологічного процесу служить, як правило, мінімальна технологічна собівартість виготовлення виробу

при максимальній продуктивності та близьким до нормативного фактичним коефіцієнтом завантаження основного технологічного обладнання без функціонального аналізу експлуатаційних характеристик виробу, покладаючись на досвід, кваліфікацію та технічну грамотність конструктора [6-8].

Об'єктно-орієнтований принцип (ООП) проектування ефективно реалізується для вільних і неспряжених поверхонь відповідно до її технологічної класифікації [5, 6].

Оброблення виконавчих і спряжених поверхонь, що забезпечують виконання виробом його службового призначення, необхідно реалізовувати згідно з функціонально-орієнтованим принципом (ФОП), характерною особливістю якого є технологічне забезпечення найефективніших експлуатаційних характеристик виробу із дотриманням призначених конструктором параметрів точності та якості поверхневого шару [7, 8].

Тому для комплексного забезпечення експлуатаційних характеристик машинобудівних виробів із дотриманням технічних вимог конструкторсько-технологічної документації є актуальним розроблення математичних моделей для прогнозування ймовірності формоутворення заготовки деталі без браку при застосуванні ФОП проектування енергоощадних технологій із подальшим їх впровадженням у машинобудівне виробництво [6, 9, 10].

Аналіз літературних джерел

При забезпеченні машиною та її складовими елементами (складальними одиницями, деталями) свого службового призначення формується множина причинно-спадкових взаємозв'язків як функцій відгуку фізичних процесів і впливів навколишнього середовища, що призводять до еволюції якісних показників виробу протягом етапів і стадій його життєвого циклу та формування умов для його фізичного та морального зношування [1, 2, 6].

Регламентовані параметри якості виробів, собівартість і продуктивність виробничого процесу забезпечуються структурою взаємозв'язків і властивостей технологічної системи ВППЗ „верстат-пристрій-інструмент-заготовка” [7, 8, 10].

Визначений виріб характеризується системою зв'язків, які описують фізичний зміст процесів у машині [7, 10]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де y – параметр службового призначення машини;

x_1, x_2, \dots, x_n – параметри зв'язків між виконавчими поверхнями машини.

На етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва рівняння (1) перетворюються у рівняння виду [7]:

$$y = f\left(\begin{matrix} \varphi_1(V_1, V_2, \dots, V_n), \varphi_2(t_1, t_2, \dots, t_m), \\ \dots, \varphi_n(r_1, r_2, \dots, r_k) \end{matrix}\right), \quad (2)$$

де $\varphi_1(V_1, V_2, \dots, V_n)$, $\varphi_2(t_1, t_2, \dots, t_m)$, \dots , $\varphi_n(r_1, r_2, \dots, r_k)$ – параметри розмірних зв'язків між виконавчими поверхнями машини.

На етапі виготовлення стадії створення виробу у його життєвому циклі необхідно реалізувати конструкторські зв'язки в готовому виробі. Поряд з тим зв'язки між параметрами технологічного процесу і експлуатаційними властивостями виробів зазвичай складні і мало досліджені для змінних експлуатаційних умов [8-10].

Проектування технологій згідно з ООП передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних етапів виготовлення виробу. За до-

помогою системи конструкторського проектування (CAD – Computer Aided Design) формується цифровий макет виробу. Для цього широко застосовують програмні продукти SolidWorks, AutoCAD, NX (Unigraphics), Pro Engineer тощо. За допомогою автоматизованих систем інженерних розрахунків (CAE – Computer Aided Engineering) моделюють силові, кінематичні, динамічні, термічні тощо умови експлуатації та перевіряють вибір конструктивних параметрів та матеріалу проєктованих деталей машин, використовуючи Ansys, MAT-LAB, SolidEdge, Fusion 360 тощо. Системи технологічного проектування (CAPP – Computer Aided Process Planning) забезпечують можливість багатоваріантного проектування технологічних процесів в автоматичному або інтерактивному режимі із можливістю автоматизованого програмування для верстатів з ЧПК (CAM – Computer Aided Manufacturing). Відомими CAPP-системами є TECHCARD, ВЕРТИКАЛЬ, ADEM, СПРТУТ-ТП, ТехноПро тощо [3].

Незважаючи на інтегрування при ООП окремих підсистем в єдину систему автоматизованого проектування, значна кількість інформаційних ресурсів в ієрархічно організованій системі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва є недоступною для розробників з інших підрозділів і не працює на досягнення основної мети проєкту, залишившись у попередньо реалізованих етапах проектування. Функціональний погляд на речі спричиняє спотворене уявлення щодо застосування ефективних критеріїв оптимізації в результаті виконання окремого етапу підготовки машинобудівного виробництва [3, 4].

На відміну від ООП, особливістю застосування ФОП для реалізації методології PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання САФ-системи (Computer Aided Forming). Робота САФ-системи визначається аналізом реологічної імітаційної моделі окремих технологічних переходів і комплексом функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термодформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Виходячи з предиктивних можливостей САФ-системи, необхідно реалізувати алгоритм розроблення раціональної структури технологічного процесу виготовлення виробу для прогнозування його експлуатаційних характеристик [3, 4, 11].

Узагальнений алгоритм синтезу із застосуванням ФОП проектування технологій, пов'язаний з функціонуванням САФ-системи в

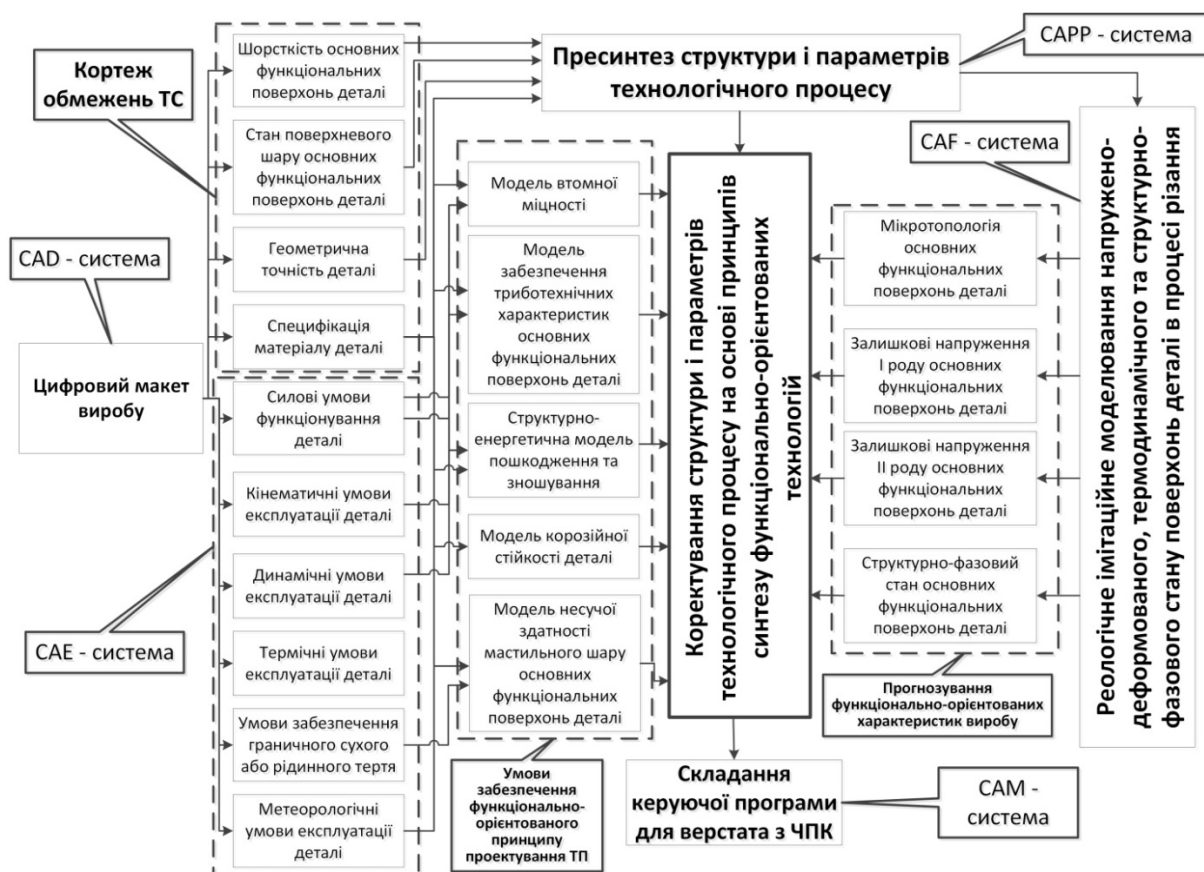


Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм функціонування САФ-системи у структурі інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва (CAD/CAPP/CAM) [3]

структурі CAD/CAE/CAPP/CAM, наведений на рис. 1 [3].

САФ-системи, що є невід’ємними складовими модернізованої інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (рис.1), класифікуються як системи формоутворення різанням (САФ-С), пластичною деформацією (САФ-Р), формування поверхневого шару (САФ-С) та формоутворення методами складання (САФ-А) [3, 11].

Процес проектування технологій з використанням принципу ФОП базується на наступних етапах [3]:

- формування цифрового макету виробу;
- формалізація та моделювання умов забезпечення ефективного функціонування виробів;
- імітаційне реологічне моделювання напружено-деформованого, термодинамічного та структурно-фазового стану найбільш відповідальних поверхонь деталі в процесі їх формоутворення;
- імітаційне прогнозування функціонально-орієнтованих властивостей виробу;
- пресинтез структури та параметрів технологічного процесу і технологічного забезпечення об’єктно-орієнтованої технології;

– коректування і синтез структури технології на базі принципів функціонально-орієнтованих технологій;

– забезпечення заданих, необхідних або граничних властивостей виробу в залежності від потенційних умов та особливостей його експлуатації в машині або технологічній системі.

Працездатність визначеного виробу, що забезпечується умовами його експлуатації, в часі має випадковий стохастичний характер і описується траєкторіями деякого випадкового процесу [4, 12]. При цьому частина випадкових величин (інтенсивності відмов, тривалість і період контролю, час відновлення тощо) мають відмінний від експоненціального розподіл, що істотно обмежує використання апробованого математичного апарату теорії марковських процесів для опису функціонування досліджуваної системи [13, 14].

У роботах [14, 15] та інших наведено аналітичні методи оцінки ефективності засобів контролю технічних пристроїв і систем. Недоліком цих робіт є те, що в них ряд прийнятих допущень рідко виконуються на практиці прийнято експоненціальний розподіл випадкових величин, використовуваних при формалізації контрольованої системи. При незалежному

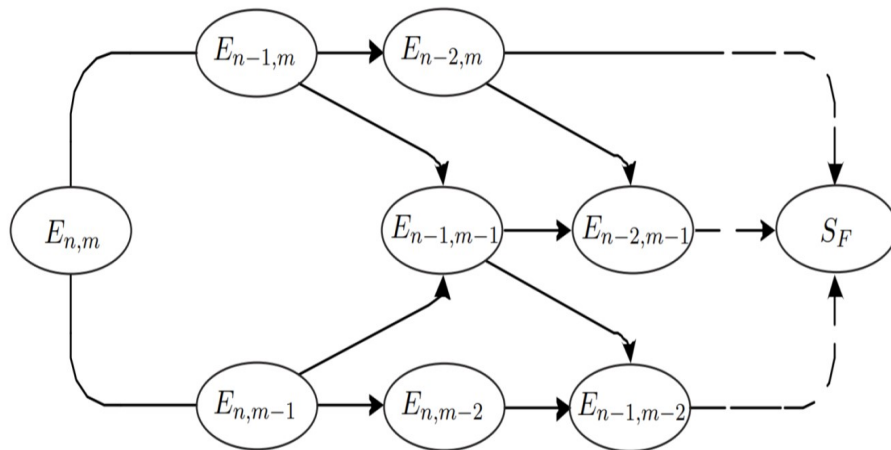


Рисунок 2 – Розширений графік станів і переходів довільно керованого модуля технічної системи [17]

функціонуванні модулів технічної системи і при різних методах ефективності контролю загальний показник ефективності технічної системи дорівнює:

$$Ef(t) = \prod_1^n Ef_i(t), \quad (3)$$

де $Ef_i(t)$ – показник ефективності контролю i -того модуля технічної системи, n – кількість її модулів.

Експлуатаційні характеристики виробу визначаються оптимальними параметрами технологічної системи при раціональній структурі технологічного процесу із врахуванням технологічного успадкування властивостей [1, 2], тому для довільної технологічної операції зокрема і технологічного процесу загалом розробляють визначений граф станів і переходів [13].

Підвищення математичної точності опису реальних фізичних процесів призводить до ускладнення математичних моделей і математичного апарату для їх дослідження. Тому актуальним завданням теорії технічних систем є розроблення методів спрощеного аналізу із отриманням математичних моделей, що застосовують у інженерній практиці. Раціональним варіантом вирішення цього завдання є побудова укрупнених систем із суттєво спрощеним аналізом вхідних математичних моделей за умови фізичної відповідності основних характеристик укрупнених і вхідних моделей [14].

Випадковий процес характеризується різною інтенсивністю переходів між відповідними станами технічної системи [14-16]. Зокрема, переходи між множинами станів E і $E_{n,m}$ відбуваються набагато рідше, ніж переходи всередині них (рис. 2) [17]. Відомо [16,17], що коефіцієнт відмов обладнання значно менший, ніж інтенсивність його несправностей, і час до вихо-

ду з ладу керованого модуля набагато довший за інтервал часу між наступними моментами планової програми контролю її правильного функціонування. Тому всю множину станів довільного модуля технічної системи можна поділити на підмножини таким чином, щоб частота переходів між станами кожного із них суцільно перевищує частоту переходів між ними [15-17]. В результаті поділу отримуємо h неперервних підмножин станів випадкового, кожен з яких може бути агрегований в окремий стан (рис. 2) [17].

При цьому вираз для визначення показника $Ef_i(t)$ ефективності контролю довільно керованого модуля технічної системи записується у вигляді [18]:

$$Ef_i(t) = P\{S(t) \in E_R\} P\{S(t) \in E_0\}, \quad (4)$$

де $P\{S(t) \in E_R\}$ та $P\{S(t) \in E_0\}$ – ймовірності присутності випадкового процесу в момент t у підмножині E_R та E_0 станів відповідно. Підмножина E_R станів випадкового процесу відповідає підмножині станів керованого модуля, знаходження у яких не призводить до вичерпання ресурсу (резервних модулів спільного використання). Іншими словами, $P\{S(t) \in E_R\}$ – це ймовірність того, що випадковий процес не досягне стану S_F протягом тимчасового інтервалу $[0, t]$ за умови, що на початку цього часового інтервалу він перебував у стані S_0 [17].

Процес, який описує поведінку визначеного модуля в часі, є відновлюваним [13]. В результаті укрупнення системи отримуємо модель із напівмарковською властивістю станів, що забезпечує застосування рівняння марковського відновлення для її опису [13, 16].

Встановлено [15, 17], що ймовірність $q_{i,j}(t)$ переходу напівмарковського процесу із стану S_i у стан S_j визначається за формулою:

$$q_{i,j}(t) = \int_0^{\infty} p(t; i, j) d\psi(t), \quad (5)$$

де $p(t; i, j)$ – умовна ймовірність переходу напівмарковського процесу із стану S_i у стан S_j за умови, що на момент t він знаходився у стані S_i , $\psi(t)$ – функція розподілу тривалості перебування напівмарковського процесу у стані S_i .

Формула (5) описує у загальному випадку ймовірність переходу напівмарковського процесу із стану S_i у стан S_j . Розв'язок рівняння (5) можливий лише для конкретної побудови технічної системи [17].

Тривіальним розв'язком залежності (5) є запропонована в [10] математична залежність для визначення ймовірності безвідмовності технологічного процесу на i -тій технологічній операції $P_i(t)$:

$$P_i(t) = \prod_1^{q_i} [1 - (1 - P_X(t)) \cdot (1 - P_X^k(t))], \quad (6)$$

де q_i – число вихідних параметрів для i -тої технологічної операції;

P_X – ймовірність безвідмовності технологічного процесу при забезпеченні X -го параметра на i -тій технологічній операції;

P_X^k – ймовірність коректного вимірювання контрольованого параметра X на i -тій технологічній операції.

У той же час, з огляду на складність та ймовірнісну природу залежностей параметрів ТП і експлуатаційних характеристик, неможливість врахування усіх параметрів виробу, що мають вагомий вплив на формування експлуатаційних характеристик через складність фізичних явищ при реалізації ТП, забезпечення «ймовірності безвідмовності технологічного процесу» на i -тій технологічній операції $P_i(t)$ зокрема і технологічного процесу $P(t)$ загалом є важко реалізованим [10].

Окрім того, залежність (6) описує лише етап виготовлення на стадії створення виробу у її життєвому циклі, не враховуючи етап конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Водночас врахування усіх етапів і стадій у життєвому циклі виробу дозволить аналізувати фізичні процеси при виготовленні деталей та формування їх вихідних параметрів з позиції технологічного успадковування властивостей.

Метою даного дослідження є розроблення математичної моделі для прогнозування ймовірності формоутворення заготовки деталі без браку на стадії створення виробу у його життєвому циклі.

Предметом цього дослідження є технологічний процес виготовлення виробів із застосування функціонально-орієнтованих принципів проєктування.

Задачі досліджень полягають у:

- аналізі умов реалізації фізичних процесів із застосуванням синергетичного підходу у дослідженні технічних систем;

- розробленні математичної моделі для прогнозування ймовірності формоутворення заготовки деталі без браку на стадії її створення при реалізації технологічного процесу виготовлення виробу;

- аналізі процесу формування вихідних параметрів виробу як результату взаємодій інтегрованої підсистеми конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та технологічної підсистеми „верстат-пристрій-інструмент-заготовка”.

Формування вихідних параметрів виробу на стадії його створення в життєвому циклі

Аналіз умов реалізації фізичних процесів із застосуванням синергетичного підходу до дослідження технічних систем

Упорядкування стану технічної системи пов'язано із узгодженою поведінкою підсистем. Об'єкт розглядається як система, якщо він містить підсистеми (ділиться на частини), що формують єдине ціле із новими властивостями із математичним описом взаємозв'язків елементів у системі і є підсистемою більшої системи. У системах (в тому числі технічних) критеріями їх життєдіяльності є енергія та ентропія [19].

Загальні закони організації та розвитку систем підлягають системному функціонально-морфологічно-інформаційному аналізу, на підставі дослідження взаємозв'язків і взаємовпливів функціонального, морфологічного та інформаційного описів [20, 21].

Функціональні процеси у системі безпосередньо пов'язані із інформаційними. При цьому джерелом інформації для її функціонування є внутрішній ресурс і середовище, а носієм – речовина (морфологічна інформація) та енергія. Внутрішня енергія характеризує еволюцію, цілі та діяльність системи [22, 23].

З позиції адитивності інформації I для множини R_0N незалежних рівноймовірних реалізацій системи $R_0 \in [R_{01}; R_{0N}]$ функціональна залежність [24]

$$I \left(\prod_{i=1}^N R_{0i} \right) = I(R_{01}) + \dots + I(R_{0N}) \quad (7)$$

має єдиний розв'язок [24]:

$$I = K \ln(R_0), \quad (8)$$

де $K = \log_b(e)$ – константа; індекс b описує індивідуальні особливості частин або підсистем [24];

$b=2$ при вираженні інформації в бітах [19, 20].

Кількісною характеристикою при еволюції інформаційних потоків служить інформація на один символ i [19]:

$$i = -K \sum_{j=1}^k p_j \cdot \ln(p_j), \quad (9)$$

де p_j – ймовірність j -того стану системи із k можливих.

Сумарна інформація, що характеризує перехід з одного стану системи в інший за умови безпосереднього взаємозв'язку між невизначеністю стану об'єкта та його фізичними властивостями [20]:

$$I = -k \cdot \sum_{j=1}^k p_i \cdot \log_b(p_i). \quad (10)$$

Взаємозв'язки між причинами та діями у системі описуються рівняннями виду $\dot{q} = F_0(q(t); t)$ [19]:

$$\dot{q} = -\gamma \cdot q + F(t), \quad (11)$$

де q – параметр, що описує дію;

γ – функція затухання; $F(t)$ – функція, що визначає зовнішній силовий вплив.

Розв'язок (10) є відгуком системи на прикладене зусилля $F(\tau)$ [19]:

$$q = \int_0^t e^{-\gamma(t-\tau)} F(\tau) d\tau. \quad (12)$$

Значення q у визначений момент часу t залежить, окрім впливів у даний момент часу, також і від успадковування подій у попередні моменти часу.

Для множини підсистем q_μ , елементи яких зв'язані через коефіцієнти впливу від зовнішніх сил F_n , представимо рівняння (11) у матричній формі [19]:

$$\dot{q}_\mu = A q_\mu + B(F) q_\mu + C(F), \quad (13)$$

де A, B – незалежні від q_μ матриці.

При ототожненні для умов самоорганізації зовнішні сили із частинами власне системи ($F \rightarrow q_1, q \rightarrow q_2$), отримаємо дві підсистеми [19]:

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 \cdot q_1 - a \cdot q_1 \cdot q_2, \quad (14)$$

$$\dot{q}_2 = -\gamma_2 \cdot q_2 + b \cdot q_1^2. \quad (15)$$

За наявності адиабатичного наближення [24]

$$\gamma_2 \geq \gamma_1 \quad (16)$$

при $\dot{q}_2 = 0$ отримаємо розв'язок [19]:

$$q_2(t) \approx \gamma_2^{-1} \cdot b \cdot q_1^2(t). \quad (17)$$

Після підстановки (17) в (14) отримаємо:

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 \cdot q_1 - \frac{a \cdot b}{\gamma_2} \cdot q_1^3, \quad (18)$$

Розв'язки рівняння (18) при $\gamma_1 > 0$ і $\gamma_1 < 0$ є різними [24]:

- при $\gamma_1 > 0$ і $\frac{a \cdot b}{\gamma_2} > 0$ отримуємо стійкий

розв'язок $q_1 = 0$

- при $\gamma_1 < 0$ і $\frac{a \cdot b}{\gamma_2} > 0$ отримуємо нестійкий

розв'язок $q_1 = 0$ і два стійких розв'язки

$$\pm \sqrt{\gamma_1 / \left(\frac{a \cdot b}{\gamma_2} \right)}, \text{ причому згідно з (17) } q_2 \neq 0$$

У даному випадку проявляються два основних синергетичних поняття: замість великого числа змінних для різних q достатньо розглянути лише одне рівняння для q_1 , а потім відповідно до принципу підпорядкування виразити q через q_1 . У такому випадку q_1 є параметрами порядку – модами, які визначають ступінь її впорядкованості та підпорядковують собі інші підсистеми [24].

Встановлено [19, 22, 24], що частина підсистем $q_j = q^{(var)} \in (j=1 \dots m)$ відповідає нестійким модам, а інша – $q_j = q^{(s)} \in (j=m+1 \dots k)$ – підпорядковується стійким.

При переведенні систем внаслідок самоорганізації у стан $q^{(s)}$ вплив флуктуацій та оптимізаційних критеріїв призводить до їх еволюції, причому величина флуктуації параметра порядку має вирішальне значення для характеру функціонування систем [19].

В самоорганізованих системах керування її адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем [24]. При адитивності величини повного виходу для підпорядкованим стійким модам інформаційних підсистем, що підпорядковується стійким модам з фіксованим параметром порядку отримаємо:

$$q^{(s)} = q_d^{(s)} + q_r^{(s)}, \quad (19)$$

де $q_d^{(s)}, q_r^{(s)}$ – відповідно чітко визначений детермінований і флуктуючий (з розсіяними характеристиками) входи.

Загальна величина виходу при цьому [19]:

$$q_\Sigma = \sum_s q^{(s)} = \sum_{j=m+1}^k q_j. \quad (20)$$

Відповідно до граничної центральної теорему для взаємнезалежних випадкових змінних повний вихід системи (20) збільшується

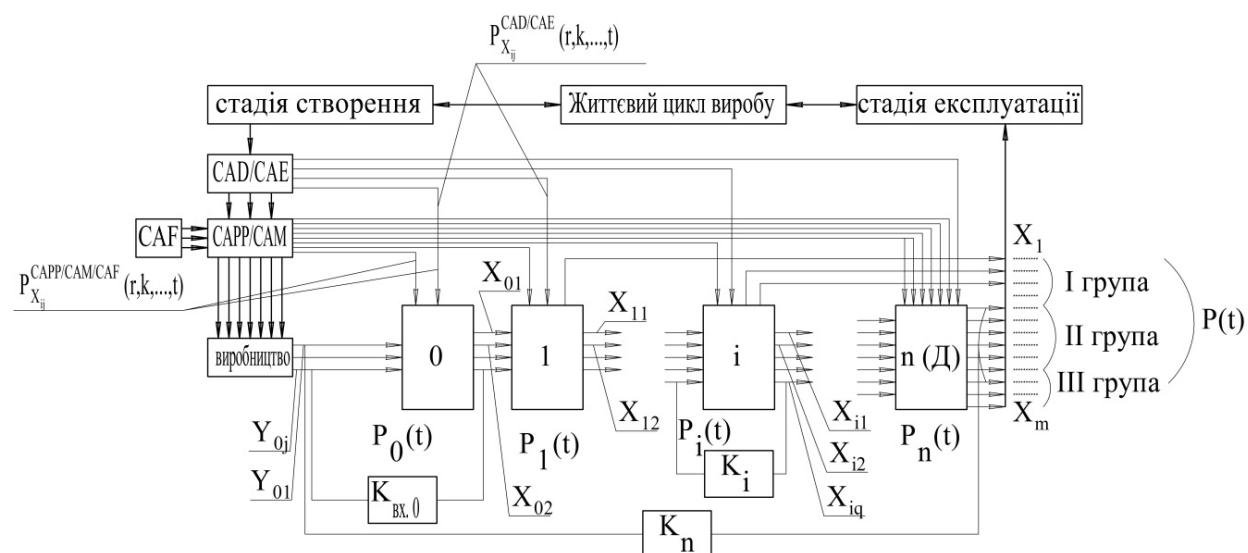


Рисунок 3 – Принципова схема формування параметрів якості виробу на стадії створення його життєвого циклу

пропорційно числу підсистем s або реалізуючих їх характеристик і критеріїв; флуктуації зростають лише як \sqrt{s} (в реальних процесах пригнічення розсіювання характеристик відбувається ще інтенсивніше). Поблизу точки виникнення нестійкості за рахунок істотної відмінності стійкі моди підлаштовуються під нестійкі і можуть бути виключені, що приводить до упорядкування системи за рахунок значного зменшення ступенів вільності [20].

Згідно з синергетичним підходом технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів відповідно до необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності реалізується обмеженою кількістю раціональних варіантів взаємодій виробу із технологічним середовищем при необхідній кількості стійких зв'язків в інформаційно-технологічній системі підготовки виробництва виробів на етапах і стадіях його життєвого циклу [3, 8].

Згідно з синергетичним підходом технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів відповідно до необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності реалізується обмеженою кількістю раціональних варіантів взаємодій виробу із технологічним середовищем на етапах і стадіях його життєвого циклу.

Аналіз процесу виготовлення без браку машинобудівного виробу на стадії створення його життєвого циклу

Якість деталі, нормована відповідними показниками, формується як загальний результат автоматизованої системи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, формо-

утворення заготовки, технологічного процесу її механічного оброблення у взаємозв'язках із технологічним середовищем: системою ВПЗ, методами контролю тощо [1, 2].

Зв'язки між параметрами технологічного процесу і експлуатаційними властивостями виробів зазвичай складні і мало досліджені для змінних експлуатаційних умов [8].

При комплексному дослідженні процесів механічного оброблення деталей і складання машин необхідно враховувати технологічне успадкування властивостей для усього ланцюжка „відправна заготовка-готова деталь” при аналізі фізичних процесів на етапах конструкторсько-технологічної підготовки та виготовлення виробу стадії створення виробу у життєвому циклі (рис. 3).

Із проведеного аналізу випливає важливість ґрунтовного дослідження формування вихідних параметрів якості виробу для забезпечення експлуатаційних характеристик і пов'язаних з ними показників надійності деталей і машин для прогнозування ймовірності виготовлення деталі без браку. Тому параметр $P_i(t)$ інтерпретуватимемо як ймовірність виготовлення деталі без браку на i -тій операції технологічного процесу, що визначається технічними рішеннями інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва та впливом системи ВПЗ (рис. 3).

Формування вихідних параметрів відбувається в результаті послідовного оброблення заготовки, що забезпечується принципами технологічного успадкування [1, 6]. Для кожної операції, як правило, встановлені свої регламентовані показники, які мають бути забезпечені

в результаті виконання технологічних переходів даної технологічної операції при виготовленні кінцевого виробу.

Тому загальна ймовірність $P(t)$ – ймовірність формування заготовки деталі без браку, що визначається числовим значенням технологічних параметрів у межах границь допуску протягом усього технологічного процесу виготовлення виробу – формується на основі особливостей III груп його вихідних параметрів [10]:

1. Незначна частина вихідних параметрів проміжних операцій (зокрема характеристики матеріалу) переходять у розряд кінцевих (параметри I групи, рис. 3).

2. Фінішні та викінчувальні технологічні операції забезпечують формування регламентованих ТУ параметрів точності оброблення та якості поверхні (параметри II групи, рис. 3).

3. Відповідно до технологічного успадкування властивостей частина вихідних параметрів (III група, рис. 3) функціонально пов'язана з параметрами попередніх проміжних операцій.

4. Характеристики матеріалу заготовки при неналежному входному контролі або його відсутності впливають на формування кінцевих параметрів виробу.

5. Контрольні операції (K , рис. 3) служать для своєчасного виявлення та недопущення браку на різних стадіях ТП.

Однак на формування вихідних параметрів виробу впливає не лише фактор часу, а й випадкові функції (r, k, \dots, t) .

Ймовірність формування заготовки деталі без браку за j -им параметром на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу визначається за формулою:

$$P_i(r, k, \dots, t) = \prod_{j=1}^{q_i} \left(1 - F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) \right), \quad (21)$$

де $X_{ij}(j \in [1; q_i])$ – визначений j -ий вихідний параметр X для i -тої технологічної операції;

$F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t)$ – ймовірність браку виробу за j -им параметром на i -тій технологічній операції технологічного процесу при його виготовленні.

Вихідні параметри після останньої технологічної операції: $X_{ij} = X_j (j \in [1; m])$.

Множина вихідних параметрів q_i для i -тої технологічної операції формує множину входних параметрів для $(i+1)$ операції, однак лише частина із них входить до множини параметрів I групи вихідних параметрів кінцевого виробу: $q_{oi} < q_i$ [10].

Тоді сумарна кількість вихідних параметрів [10] становитиме:

$$m = q_n + \sum_{i=0}^{n-1} q_{oi}, \quad (22)$$

де q_n – число вихідних параметрів, отриманих на останній операції;

q_{oi} – число вихідних параметрів для i -тої технологічної операції, які формують вихідні параметри I групи.

Для технологічного процесу при незалежному формуванні кожного вихідного параметра ймовірність формування заготовки деталі без браку $P(t)$ в загальному випадку визначається за формулою:

$$P(r, k, \dots, t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=0}^n \prod_{j=1}^m \left(1 - F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) \right). \quad (23)$$

Із врахуванням взаємозв'язків у інтегрованій системі конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та впливу технологічної системи ВПІЗ отримаємо:

$$F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) = F_{X_{ij}}^{DTP}(r, k, \dots, t) \times F_{X_{ij}}^{TCS}(r, k, \dots, t), \quad (24)$$

$$F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) = F_{X_{ij}}^{CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF}(r, k, \dots, t) \times F_{X_{ij}}^{MT/MD/MCT/W(P)}(r, k, \dots, t), \quad (25)$$

де $F_{X_{ij}}^{DTP}(r, k, \dots, t)$,

$F_{X_{ij}}^{CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF}(r, k, \dots, t)$ – відповідно

ймовірність формування заготовки деталі з браком за j -им параметром на i -тій технологічній операції із врахуванням взаємозв'язків загалом у інтегрованій системі конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва (Design and Technological Preproduction) і з врахуванням ефективності CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF систем;

$$F_{X_{ij}}^{TCS}(r, k, \dots, t), F_{X_{ij}}^{MT/MD/MCT/W(P)}(r, k, \dots, t)$$

– відповідно ймовірність формування заготовки деталі з браком за j -им параметром на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу технологічної системи ВПІЗ (Technological Cutting System): верстат (Machine Tool) – пристрій (Machine Device) – металорізальний інструмент (Machine Cutting Tool) – заготовка (виріб) (Workpiece (Product)).

Використовуючи правила теорії ймовірності, отримаємо:

$$F_{X_{ij}}^{CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF}(r, k, \dots, t) = F_{X_{ij}}^{CAD}(r, k, \dots, t) \cdot F_{X_{ij}}^{CAE}(r, k, \dots, t) \times F_{X_{ij}}^{CAPP}(r, k, \dots, t) \cdot F_{X_{ij}}^{CAM}(r, k, \dots, t) \times F_{X_{ij}}^{CAF}(r, k, \dots, t), \quad (26)$$

$$F_{X_{ij}}^{MT/MD/MCT/W(P)}(r, k, \dots, t) = F_{X_{ij}}^{MT}(r, k, \dots, t) \cdot F_{X_{ij}}^{MD}(r, k, \dots, t) \times F_{X_{ij}}^{MCT}(r, k, \dots, t) \cdot F_{X_{ij}}^{W(P)}(r, k, \dots, t), \quad (27)$$

де $F_{X_{ij}}^{CAD}$, $F_{X_{ij}}^{CAE}$, $F_{X_{ij}}^{CAPP}$, $F_{X_{ij}}^{CAM}$, $F_{X_{ij}}^{CAF}$ – ймовірність формоутворення заготовки деталі з браком за j -им параметром на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу відповідно CAD, CAE, CAPP, CAM, CAF систем;

$F_{X_{ij}}^{MT}$, $F_{X_{ij}}^{MD}$, $F_{X_{ij}}^{MCT}$, $F_{X_{ij}}^{W(P)}$ – ймовірність

формоутворення заготовки деталі з браком на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу відповідно верстату, пристрою, інструменту та заготовки.

Застосувавши теорему додавання несумісних подій до (26), (27), отримаємо:

$$F_{X_{ij}}^{CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF}(r, k, \dots, t) = (1 - P_{X_{ij}}^{CAD}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{CAE}(r, k, \dots, t)) \cdot (1 - P_{X_{ij}}^{CAPP}(r, k, \dots, t)) \cdot (1 - P_{X_{ij}}^{CAM}(r, k, \dots, t)) \cdot (1 - P_{X_{ij}}^{CAF}(r, k, \dots, t))$$

$$F_{X_{ij}}^{MT/MD/MCT/W(P)}(r, k, \dots, t) = (1 - P_{X_{ij}}^{MT}(r, k, \dots, t)) \cdot (1 - P_{X_{ij}}^{MD}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{MCT}(r, k, \dots, t)) \cdot (1 - P_{X_{ij}}^{W(P)}(r, k, \dots, t)) \quad (29)$$

де $P_{X_{ij}}^{CAD}$, $P_{X_{ij}}^{CAE}$, $P_{X_{ij}}^{CAPP}$, $P_{X_{ij}}^{CAM}$, $P_{X_{ij}}^{CAF}$ – ймовірність формоутворення заготовки деталі без браку за j -им параметром на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу відповідно CAD, CAE, CAPP, CAM, CAF систем;

$P_{X_{ij}}^{MT}$, $P_{X_{ij}}^{MD}$, $P_{X_{ij}}^{MCT}$, $P_{X_{ij}}^{W(P)}$ – ймовірність

формоутворення заготовки деталі без браку за j -им параметром на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу відповідно верстату, пристрою, інструменту та заготовки (деталі).

При виготовленні виробу для своєчасного виявлення та недопущення браку за вихідними параметрами проміжних і фінішних (викінчально-зміцнювальних) технологічних операціях застосовують різні методи контролю. Функції контролю виконують контрольні операції у структурі ТП, технологічні процеси технічного контролю виробів, натурні випробування, що проводять після виготовлення деталей і складання машини. Ефективність вихідного контролю характеризується ймовірністю коректного вимірювання контрольованого параметра згідно з ТУ P^k . Зважаючи на неабсолютну можливість контрольних операцій у визначеному ТП виготовлення виробу, необхідно мінімізувати їх кількість, з огляду на додаткові матеріальні витрати [10].

Із врахуванням (28), (29) і додаванням контрольних операцій у структуру ТП, ймовірність формоутворення заготовки деталі без браку на стадії її створення при реалізації технологічного процесу виготовлення виробу визначається за формулою:

$$P(r, k, \dots, t) = \prod_{i=0}^n P_i(r, k, \dots, t) = \prod_{i=0}^n \prod_{j=1}^m (1 - (1 - P_{X_{ij}}^{CAD}(r, k, \dots, t)) (1 - P_{X_{ij}}^{CAE}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{CAPP}(r, k, \dots, t)) (1 - P_{X_{ij}}^{CAM}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{CAF}(r, k, \dots, t)) (1 - P_{X_{ij}}^{MT}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{MD}(r, k, \dots, t)) (1 - P_{X_{ij}}^{MCT}(r, k, \dots, t)) \times (1 - P_{X_{ij}}^{W(P)}(r, k, \dots, t)) (1 - P_{X_{ij}}^{W(P)(k)}(r, k, \dots, t))) \quad (30)$$

Залежно від експлуатаційних умов відповідно до службового призначення виробу, регламентованих параметрів його якості та принципів технологічного успадкування властивостей, формуватиметься множина розв'язків системи (30), що визначають ступінь впливу технологічних підсистем на забезпечення вихідних параметрів деталі:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{CAD}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{CAE}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{CAPP}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{CAM}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{CAF}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{MD}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{MCT}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 0 &\leq P_{X_{ij}}^{W(P)}(r, k, \dots, t) \leq 1; \\
 P_{X_{ij}}^{W(P)(k)}(r, k, \dots, t) &= 0; 1.
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Рациональний шлях формування функціонального опису при аналізі технічної системи полягає у застосуванні багаторівневої ієрархії інформаційного забезпечення [19, 24], при якій опис вищого рівня забезпечуватиметься узагальненими та факторизованими змінними нижчого рівня. Ієрархія створюється порівневою факторизацією процесів $\{F_i\}$ за допомогою узагальнених параметрів $\{Q_j\}$, що є функціоналами $\{F_i\}$ при кількості параметрів, значно меншій числа змінних [20].

В самоорганізованих системах керування їх адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем [24]. В замкнених ізольованих підсистемах ентропія зростає, і для забезпечення цієї умови у розімкнених відкритих підсистемах, що обмінюються ресурсами і інформацією із зовнішнім середовищем, застосовують розподіл ймовірностей і введення ізольованих резервуарів [2].

Функції резервуарів при виготовленні виробів при взаємодії двох підсистем вищого рівня: інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та технологічної системи ВПЗ виконують підсистеми контролю. При застосуванні ФОП при проектуванні ТП за допомогою підсистеми нижчого рівня САФ здійснюється прогнозування функціонально-орієнтованих характеристик виробу як результат роботи інших підсистем нижчого рівня: CAD, CAE, CAPP, CAM. У даному випадку підсистема САФ виконує функції контролю і визначення прогнозованих значень функціонально-орієнтованих характеристик виробу здійснюється відповідно до алгоритмів.

Для технологічної системи ВПЗ ефективність вихідного контролю характеризується

ймовірністю коректного вимірювання контрольованого параметра згідно з технічними вимогами $P_{X_{ij}}^{W(P)(k)}(r, k, \dots, t)$. Для неконтрольованих X_{ij} параметрів на i -тій технологічній операції $P_{X_{ij}}^k(t) = 0$, і ймовірність його забезпечення визначається системами CAD/CAE/CAPP/CAM/CAF і ВПЗ. Для абсолютно надійного контролю $P_{X_{ij}}^k(t) = 1$, що дозволяє своєчасно відбракувати деталь або виправити брак. Зважаючи на безмежні можливості контрольних операцій у визначеному ТП виготовлення виробу, необхідно мінімізувати їх кількість, з огляду на додаткові матеріальні витрати, застосовуючи їх для визначення параметри виконавчих поверхонь деталей машин [10].

Висновки

Проведені дослідження дозволили сформулювати основні положення системного підходу до формування вихідних параметрів виробів на стадії їх створення у життєвих циклах при реалізації функціонально-орієнтованих принципів проектування. Проаналізовано умови реалізації фізичних процесів з позиції синергетичного підходу у дослідженні технічних систем. Розроблено математичну модель для прогнозування ймовірності формоутворення заготовки деталі без браку на стадії її створення при реалізації технологічного процесу виготовлення виробу. Наведено множину розв'язків математичної моделі, що визначають ступінь впливу технологічних підсистем на забезпечення вихідних параметрів виробу. З позиції синергетичного підходу розглянуто процес формування вихідних параметрів виробу як результат взаємодії інтегрованої підсистеми конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та технологічної підсистеми „вертат-пристрій-інструмент-заготовка” із забезпеченням контролю параметрів якості виробу за допомогою САФ-підсистеми і підсистеми реалізації контрольних операцій. Подальші дослідження у цьому напрямку будуть стосуватися розробленню алгоритмів визначення шуканих розв'язків математичної моделі при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталі із використанням функціонально-орієнтованого принципу проектування при забезпеченні регламентованих показників якості їх виконавчих поверхонь.

Література

1. Kusyi Ya. M., Kuk A. M. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Volume 1426. DOI: 10.1088/1742-6596/1426/1/012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>.
2. Kheifetz M. L., Vasilyev A. S., Klimenko S. A. Technological Control of the Heredity of Operational Quality Parameters for Machine Parts. *Advanced Materials and Technologies*. 2019. No 2. P. 8–18. DOI: 10.17277/amt.2019.02.pp.008-018.
3. Stupnytsky V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013. Vol. 2, Issue 9. P. 1181–1186.
4. Stupnytsky V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of mechanical engineering*. 2020. Vol. 2, No 2. P. 1–19. DOI: 10.24425/ame.2020.131688.
5. Stupnytsky V. Computer aided machine-building technological process planning by the methods of concurrent engineering. *Europische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift*, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. 2013. No 3, Section 13. P. 346–354.
6. Kusyi Ya., Stupnytsky V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020*, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine. 2020. Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. P. 276–284. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_27.
7. Колесов И. М. Основы технологи машиностроения. М.: Машиностроение, 2000. 591 с.
8. Инженерия поверхности деталей / Сушков А. Г. и др. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
9. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин и др.; под. общ. ред. П. А. Витязя. Минск : Беларус. навука, 2010. 109 с.
10. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.
11. Stupnytsky V. Subsystem of rheological forming modeling in integrated CAD/CAPP/CAM system in machine building. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика»*. 2012. № 747. С. 139–142. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/33445/1/26-139-142.pdf>.
12. Stupnytsky V. New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering. *Europaische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing, Stuttgart*. 2012. No 1. P.327–329.
13. Мелень Р. В., Козунь В. І. Метод оцінки ефективності комплексної системи контролю правильності функціонування телекомунікаційних систем бездротового зв'язку. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: зб. тез доповідей ІХ між нар.наук.-практ.конф., м. Запоріжжя, 3–5 жовтня 2018. Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. С. 49-50. URL: http://rtt.zntu.edu.ua/data/Tezy_ZNTU_2018.pdf.*
14. Иьуду К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: учеб. пособие для вузов по спец. «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». М.: Высш. школа, 1989. 216 с.
15. Журавлев Ю. П., Котелюк Л. А., Циклинский Н. И. Надежность и контроль ЭВМ. М.: Сов. радио, 1978. 416 с.
16. Королюк В. С., Турбин А. Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.
17. Bobalo Yu. Ya., Horbatyi I. V., Kise-lychnyk M. D., Medynsky I. P., Melen M. V. Semi-Markov reliability model of functioning of wireless telecommunication system with complex control system. *Mathematical modeling and computing*. 2019. Vol. 6, No 2. P. 192-210. DOI: 10.23939/mmc2019.02.192.
18. Матов В. И., Белоусов Ю. А., Федосеев Е. П. Бортовые цифровые вычислительные машины и системы. М.: Высш. школа, 1988. 216 с.
19. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 400 с.
20. Дружинин В.В., Конторов, Д.С. Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем. М.: Сов. радио, 1976. 296 с.
21. Кононюк А. Е.: Системология. Общая теория систем: в 4-х кн. Кн. 1. Начала. К.: Освіта України. 2014. 564 с. URL: <http://ecat.diit.edu.ua/ft/Systemology1.pdf>.
22. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир, 1979. 279 с.
23. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.

24. Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems: Third Enlarged Edition. Berlin: Springer, 2006. 258 p. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.

References

1. Kusiya Ya. M., Kuk A. M. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Volume 1426. DOI:10.1088/1742-6596/1426/1/012034 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>
2. Kheifetz M. L., Vasilyev A. S., Klimenko S. A. Technological Control of the Heredity of Operational Quality Parameters for Machine Parts. *Advanced Materials and Technologies*. 2019. No 2. P. 8–18. DOI: 10.17277/amt.2019.02.pp.008-018
3. Stupnytsky V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013. Vol. 2, Issue 9. P. 1181–1186.
4. Stupnytsky V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of mechanical engineering*. 2020. Vol. 2, No 2. P. 1–19. DOI: 10.24425/ame.2020.131688.
5. Stupnytsky V. Computer aided machine building technological process planning by the methods of concurrent engineering. *Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany*. 2013. No 3, Section 13. P. 346–354.
6. Kusiya Ya., Stupnytsky V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine*. 2020. Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. P. 276–284. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_27.
7. Kolesov I. M. Osnovy tehnologi mashinostroeniya. M.: Mashinostroenie, 2000. 591 p. [in Russian]
8. Inzheneriya poverhnosti detaley / Suslov A. G. and other. M.: Mashinostroenie, 2008. 320 p. [in Russian]
9. Tehnologicheskie i ekspluatatsionnyie metodyi obespecheniya kachestva mashin / V.B. Algin i dr.; pod. obsch. red. P. A. Vityazyu. Minsk : Belarus. navuka, 2010. 109 p. [in Russian]
10. Pronikov A. S. Parametricheskaya nadezhnost mashin. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2002. 560 p. [in Russian]
11. Stupnytsky V. Subsystem of rheological forming modeling in integrated CAD/CAPP/CAM system in machine building. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» «Kompiuterni systemy proektuvannia. Teoriia i praktyka»*. 2012. No 747. P. 139–142. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/33445/1/26-139-142.pdf>.
12. Stupnytsky V. New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering. *Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart*. 2012. No 1. P.327–329.
13. Melen R. V., Kozun V. I. Metod otsinky efektyvnosti kompleksnoi systemy kontroliu pravylnosti funktsionuvannia telekomunikatsiinykh system bezdrotovoho zviazku. *Suchasni problemy i dosiahnennia v haluzi radiotekhniky, telekomunikatsii ta informatsiinykh tekhnolohii: zb. tez dopovidei IKh mizh nar.nauk.-prakt.konf., m. Zaporizhzhia, 3–5 zhovtnia 2018. Zaporizhzhia: ZNTU, 2018. S. 49-50. URL: http://rtt.zntu.edu.ua/data/Tezy_ZNTU_2018.pdf. [in Ukrainian]*
14. Iyiudu K. A. Nadezhnost, kontrol i diagnostika vyichislitelnyih mashin i sistem: ucheb. posobie dlya vuzov po spets. «Vyichislitelnyie mashinyi, kompleksyi, sistemyi i seti». M.: Vyssh. shkola, 1989. 216 p. [in Russian]
15. Zhuravlev Yu. P., Kotelyuk L. A., Tsiklinskiy N. I. Nadezhnost i kontrol EVM. M.: Sov.radio, 1978. 416 p. [in Russian]
16. Korolyuk V. S., Turbin A. F. Protsessyi markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. Kiev: Naukova dumka, 1982. 236 p. [in Russian]
17. Bobalo Yu. Ya., Horbatiy I. V., Kiselychuk M. D., Medynsky I. P., Melen M. V. Semi-Markov reliability model of functioning of wireless telecommunication system with complex control system. *Mathematical modeling and computing*. 2019. Vol. 6, No 2. P. 192-210. DOI: 10.23939/mmc2019.02.192.
18. Matov V. I., Belousov Yu. A., Fedoseev E. P. Bortovyie tsifrovyye vyichislitelnyie mashinyi i sistemyi. M.: Vyssh. shkola, 1988. 216 p. [in Russian]
19. Haken G. Sinergetika. M.: Mir, 1980. 400 p. [in Russian]

20. Druzhinin V.V., Kontorov, D.S. Problemyi sistemologii: problemyi teorii slozhnyih sistem. M.: Sov. radio, 1976. 296 p. [in Russian]

21. Kononyuk A. E.: Sistemologiya. Obschaya teoriya sistem: v 4-h kn. Kn. 1. Nachala. K.: OsvIta UkraYini. 2014. 564 p. URL: <http://ecat.diit.edu.ua/ft/Systemology1.pdf>. [in Russian]

22. Ebeling V. Obrazovanie struktur pri neobratimyyih protsessah. Vvedenie v teoriyu dissipativnyih struktur. M.: Mir, 1979. 279 p. [in Russian]

23. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. Sistemotekhnika. M.: Radio i svyaz, 1985. 200 p. [in Russian]

24. Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems: Third Enlarged Edition. Berlin: Springer, 2006. 258 p. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.