

Є. В. КОНОПЛЯНЧЕНКОкандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4814-1796**Н. В. ТАРЕЛЬНИК**кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

РОЗРОБКА СИСТЕМИ СПРЯМОВАНОГО ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЯГНЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ ТА РЕМОНТІ

В представленій статті відмічена актуальність ефективного функціонування та технічного обслуговування насосного обладнання (НО) для забезпечення безпеки та стабільності атомних електростанцій (АЕС). Це є важливим не тільки для підтримки матеріального стану станції, але й впливає на загальну безпеку, а також на підвищення ефективності експлуатації та зниження витрат на експлуатацію. В аналізі існуючих робіт в цьому напрямку показано, що система спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхні деталей насосного обладнання на АЕС, включає в себе всі етапи їх життєвого циклу починаючи з її конструкції і закінчуючи її утилізацією. При цьому на кожному етапі існує низка спеціальних методів спрямованого вибору, які враховують купу їх необхідних характеристик (надійність, вартість, технологічність, екологічну безпеку тощо).

Мета даної роботи міститься в підвищенні якості процесу виготовлення та ремонту деталей НО АЕС шляхом синтезу раціонального варіанту технології формування їх робочих поверхонь. В результаті, ґрунтуючись на проведених теоретичних дослідженнях розроблена формалізована модель генерації раціональних варіантів технологій виготовлення деталей насосів АЕС, яка враховує кожний етап життєвого циклу виробу, та дозволяє сформувати множину раціональних рішень, з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій. Розроблено метод синтезу варіантів технологій досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, який враховує вимоги по надійності роботи обладнання та його екологічній безпечності. Також розроблена система спрямованого вибору раціонального варіанту вибору технології виготовлення деталей насосів, яка дозволяє забезпечити необхідну якість робочих поверхонь найбільш економічними методами.

Ключові слова: спрямований вибір, технологія, насосне обладнання атомних електростанцій, надійність, якість, екологічна безпека.

I. V. KONOPLIANCHENKOPh.D., Associate Professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4814-1796**N. V. TARELNYK**Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

DEVELOPMENT OF A DIRECTED CHOICE SYSTEM FOR THE REQUIRED QUALITY ACHIEVING TECHNOLOGY OF NPP PUMPING EQUIPMENT SURFACE PARTS DURING THEIR MANUFACTURING AND REPAIR

The presented article notes the relevance of effective operation and maintenance of pumping equipment (PE) to ensure the safety and stability of nuclear power plants (NPP). This is important not only for maintaining the material condition of the plant, but also affects overall safety, as well as increasing operational efficiency and reducing operating costs. An analysis of existing works in this direction shows that the directed choice system of technology for achieving the required surface quality of pumping equipment parts at NPP includes all stages of their life cycle, starting from its design and ending with its utilization. At the same time, at each stage there are a number of special methods of directed choice that take into account a bunch of their necessary characteristics (reliability, cost, manufacturability, environmental safety, etc.).

The aim of this work is to improve the quality of the manufacturing and repair process of NPP PE parts by synthesizing a rational variant of the their working surfaces forming technology. As a result, based on the theoretical studies conducted, a formalized model for generating rational options for NPP pump parts manufacturing technologies has been developed.

which takes into account each stage of the product's life cycle and allows for the formation a of rational solutions set, using various implementation methods or their combinations. A method for synthesizing options for technologies for achieving the required surface quality of NPP pump parts during their manufacture and repair has been developed, which takes into account the requirements for the reliability of the equipment and its environmental safety. A directed choice system of a rational option for selection the technology for manufacturing pump parts has also been developed, which allows for the required quality of working surfaces by the most economical methods.

Key words: directed choice, technology, nuclear power plant pump equipment, reliability, quality, environmental safety.

Постановка проблеми

Як важливий компонент глобальної енергетичної системи, атомні електростанції (АЕС) залежать від ефективного функціонування та технічного обслуговування їхнього обладнання для забезпечення безпеки та стабільності. Технічне обслуговування атомних електростанцій є важливим не тільки для підтримки матеріального стану станції, але й впливає на загальну безпеку, а також на підвищення ефективності експлуатації та зниження витрат на експлуатацію [1].

Щоб забезпечити безпечне, надійне та ефективне виробництво енергії, експлуатаційне технічне обслуговування АЕС повинно здійснюватися відповідно до суворих технічних умов. Безпечні, надійні та економічні атомні електростанції зазвичай демонструють дбайливу, консервативну експлуатацію та суворі, добре сплановані заходи з технічного обслуговування, щоб мінімізувати ризики для працівників, населення та навколишнього середовища. Добре керовані атомні електростанції постійно прагнуть покращувати свої стандарти експлуатації та обслуговування. Технічне обслуговування включає профілактичні та коригувальні заходи, які гарантують, що конструкції, системи та компоненти здатні виконувати свої проектні функції. Типова діяльність включає капітальний ремонт, ремонт і заміну системних компонентів і може бути покращена шляхом тестування, калібрування та перевірок під час експлуатації [2].

Система спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхні деталей насосного обладнання на АЕС, включає в себе всі етапи їх життєвого циклу починаючи з її конструкції і закінчуючи її утилізацією. При цьому на кожному етапі існує низка спеціальних методів спрямованого вибору, які враховують купу їх необхідних характеристик (надійність, вартість, технологічність, екологічну безпеку тощо). Не менш важливим є врахування впливу методів, що обираються на кожному етапі, одного на інший, тому що в кінцевому результаті це може суттєво сказатись на якості поверхневого шару обраної деталі, а також на виробі в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальна кількість проблем та завдань, які потрібно вирішити під час розробки технології досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, характеризують предметну область методики в дійсному дослідженні. Для отримання кінцевого результату згідно вибору необхідної якості поверхневого шару деталі потрібно виділити дві стадії її існування: інформаційну, що складається з науково-технічної підготовки виробництва: конструкторської підготовки виробництва (КПВ) і технологічної підготовки виробництва (ТПВ) та матеріальну (виробництво, експлуатацію, ремонт і утилізацію), які тісно пов'язані між собою [3].

Роль інформаційної сфери дуже швидко зростає, з'являються нові і досить перспективні технології, велика увага приділяється розробці екологічно безпечних методів впливу на поверхневий шар деталей, покращенню його властивостей тощо. Незважаючи на це, використання розроблених нових технологій, потребує, особливо на стадіях виробництва і ремонту, таких технологічних рішень, щоб була можливість управляти параметрами якості поверхні. Наприклад, в умовах виробництва, працівники повинні точно знати, який час потрібно витримувати деталь з конкретного матеріалу (сталь 20, 40Х, 38Х2МЮА, чавун ВЧ60-2, СЧ40 тощо) в камері установки іонного азотування, щоб отримати шар підвищеної твердості в конкретних межах. Передчасне зупинення і вивантаження деталі призведе до браку, а перетримка більше за визначений час – до значних непотрібних збитків електроенергії, а також збільшення людської праці. Тому для управління параметрами якості поверхонь деталей, перед запуском технології їх виготовлення, необхідно провести низку дослідів і встановити аналітичні залежності їх величини від технологічних режимів що на них впливають.

В [4] показано, що відпрацювання на технологічність конструкцій виробів та деталей це один з найважливіших етапів ТПВ. Автори в якості доказу показують, що при удосконаленні технологічності конструкції виробу можна зменшити трудомісткість складання на 8... 12 %, а деколи і на 20 %, а її собівартість до 10 %.

Під час відпрацюванні на технологічність потрібно враховувати всі стадії життєвого циклу деталі (рис. 1). При цьому коригуються усі, чи окремі, параметри якості і властивості поверхонь деталей або обирається більш раціональна їх технологія. При цілеспрямованому корегуванні технологічною раціональністю конструкції деталей насосу можна значно змінювати економічні, енергетичні, екологічні та інші показники виробництва, а також показники параметрів якості їх поверхонь, та методи їх досягнення.

Основною вимогою, на всіх стадіях життєвого циклу деталей насосів АЕС є надійність, тому що відхилення від цих вимог може привести, в кращому випадку до незапланованої зупинки обладнання, а в гіршому до значної аварії.



Рис. 1. Використання системи спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості поверхневих шарів деталей насосів АЕС на різних етапах життєвого циклу

Під час КПВ, при проектуванні деталі, яка виконує свої визначені функції, конструктор повинен знати методи, завдяки яким поверхня отримає необхідні характеристики (твердість, глибину зміцнення, або шару зниженої твердості, яким методом можна цього досягнути тощо) та відповідно призначати ці методи впливу (технологічна раціональність конструкції). Практика показує, що таких методів може бути багато. Досягнути підвищення твердості поверхневого шару сталі деталі можна використовуючи одну з технологій ХТО (цементацію, азотування, нітроцементацію, алітування тощо), обробку ППД, лазерну обробку, метод ЕІЛ і таке інше. Обираючи необхідний метод потрібної характеристики поверхні деталі перевагу, в першу чергу, потрібно віддавати досягненню при цьому її надійності, потім екологічній безпеці самого методу і нарешті його собівартості. При використанні для підвищення твердості поверхневого шару метода ЕІЛ відомо, що він є екологічно безпечним і по собівартості менший серед інших методів, але значно програє їм по надійності так як після його використання знижується втомлювальна міцність деталі. Тому метод ЕІЛ неможливо використовувати для обробки деталей насосів АЕС без додаткової обробки ППД, після якої величина втомлювальної міцності стає більше чим була до обробки ЕІЛ.

На етапі ТВП, при плануванні раціональної технології заданих властивостей поверхонь, також в першу чергу потрібно враховувати досягнення потрібної характеристики надійності, далі екологічній безпеці і собівартості самого методу.

Використовуючи результати запланованих параметрів якості поверхневого шару деталі, з'явиться можливість розробити більш раціональну технологію отримання заготовки (з більш дешевого, але не менш надійного матеріалу, використання заготовок з меншими припусками на обробку, проведення термічної обробки не всій поверхні, а в конкретному, локальному місці тощо) [5]. З появою нових методів виготовлення деталей механічну обробку металорізальними інструментами можна замінити іншими методами (виготовленням на 3D принтері, електроерозійною обробкою тощо) які більш підходять для будівництва основи формування поверхневого шару з потрібними параметрами якості і які більш обґрунтовані з точки зору надійності, екологічної безпеки і економіки.

Технологія управління параметрами якості поверхневого шару потрібна і на етапі планування і використання процесу складання деталей [6]. Стан поверхневого шару має значний вплив на якість складання і відрізняється при різних операціях складання: пайці, зварюванні, склеюванні, з натягом тощо.

В залежності від якості поверхневого шару деталі використовуються ті, або інші методи контролю її властивостей і проведення потрібних іспитів [7].

На стадії експлуатації виробу (насосу), володіючи технологією управління параметрами якості поверхневого шару деталей, з'являється можливість більш раціонального його використання в тих чи інших умовах виробництва на АЕС.

На етапі проведення ремонту насосів, використання системи спрямованого вибору потрібної технології отримання параметрів якості поверхонь деталей, дозволяє більш вдало вирішувати виникаючі проблеми їх ремонтпридатності, а використання результатів наукових досліджень, дуже часто дозволяє ремонт змінювати на реновацію, а інколи дозволяє провести модернізацію окремого вузла або всього насосу [8].

Надійність повинна бути на першому місці і на етапі утилізації насосів АЕС. Особливо це відноситься до насосів, що знаходились при технічному обслуговуванні й ремонті енергоблоків, коли радіоактивними стають деталі заміненого обладнання, використовуваний інструмент, труби тощо. Тверді радіоактивні відходи після переробки зберігають у сховищах, спеціально споруджених на території АЕС [9].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є підвищення якості процесу виготовлення та ремонту деталей насосного обладнання АЕС шляхом синтезу раціонального варіанту технології формування їх робочих поверхонь.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математично життєвий цикл виробу можна представити у вигляді множини раціональних рішень (реалізацій задачі) на кожному етапі циклу. При цьому існує множина рішень з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій. Задача спрямованого вибору полягає в тому, щоб знайти таку сукупність методів на кожному етапі життєвого циклу, яка в результаті приведе до рішення, оптимізованого з точки зору вибраних критеріїв, таких як надійність роботи обладнання, його екологічна безпечність, мінімальна собівартість виготовлення виробу при цьому повинні дотримуватися показники якості процесу виготовлення виробу та досягнення його технічних характеристик.

Рішення задачі припускає наявність множин варіантів її реалізації, тому з математичної точки зору вона представляється у вигляді матриці рішень $R = [r_i]$.

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо рішення існує} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Таким чином відбувається відсіювання всіх варіантів рішення задачі, які не відповідають необхідним умовам її реалізації.

Із сукупності варіантів, що реалізуються, та які дозволяють досягти рішення R_0 формується граф (рис. 2), в якому m – є складністю реалізації (кількістю етапів).

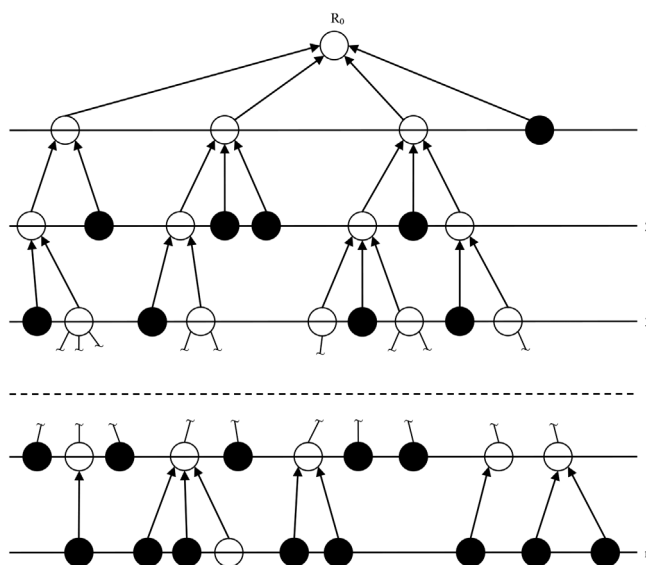


Рис. 2. Граф рішення задачі, що складається з m етапів

При цьому в якості вузлів графу виступають методи рішення етапу задачі, а ребрами графу є технології, які дозволяють реалізувати конкретний метод.

Таким чином множину існуючих варіантів рішення можна записати у вигляді:

$$\Omega\{R_0(r_i)\} = R^1\{r_i\} \cup R^2\{r_i\} \cup \dots \cup R^{m-1}\{r_i\} \cup R^m\{r_i\},$$

де $R^{1\dots m}\{r_i\}$ – множина варіацій рішення задачі на всіх m етапах в межах n -го етапу життєвого циклу виробу. В цьому випадку умовою формування множин буде:

$$R^j\{r_i\} = \bigcup R\{r_i\} | r_i = 1.$$

Тобто на кожному етапі життєвого циклу виробу існує множина досяжності реалізацій для якої повинна виконуватися умова:

$$\Omega^n \{R_0(r_i)\} \Big|_{r_i=1} \{R_0(r_i)\} \notin \emptyset.$$

В цьому випадку загальна математична модель сукупності рішень з урахуванням кожного етапу життєвого циклу виробу має вигляд:

$$\Psi \{R_0(r_i)\} = \Omega^1 \{R_0^1(r_i)\} \cup \Omega^2 \{R_0^2(r_i)\} \cup \dots \\ \dots \cup \Omega^{n-1} \{R_0^{n-1}(r_i)\} \cup \Omega^n \{R_0^n(r_i)\}.$$

На рисунку 3 наведена схема пошуку раціонального варіанту рішення, який буде задовольняти заданим критеріям оптимізації, з урахуванням технологічних обмежень та впливу кожного етапу життєвого циклу виробу від конструкторсько-технологічної підготовки виробництва до етапу виводу виробу з експлуатації та його безпечної утилізації. Дана задача пошуку є багатокритеріальною, а саме за критерієм надійності роботи виробу – P , екологічної безпеки – χ , та економічної доцільності впровадження інженерних рішень – C . При чому економічна доцільність перевіряється з урахуванням всіх етапів життєвого циклу виробу. Тобто в межах одного етапу може бути згенерована множина рішень, які є найкращими з точки зору екологічної безпеки та експлуатаційної надійності, але мають різну технологічну собівартість їх реалізації. В якості раціонального варіанту рішення приймається той, який має мінімальну сумарну технологічну собівартість по всіх етапах життєвого циклу виробу.

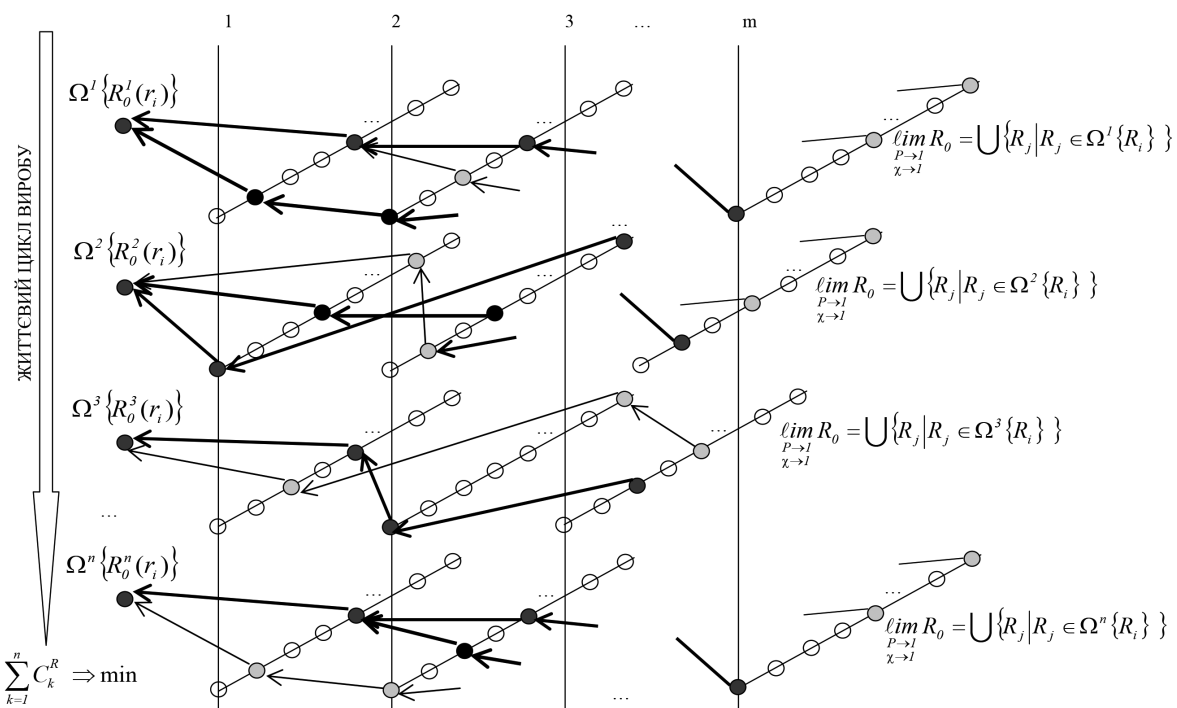


Рис. 3. Схема пошуку раціонального варіанту загального рішення на кожному етапі життєвого циклу виробу

Розглянемо докладно критерії, за якими здійснюється пошук раціонального варіанту.

Кількісна оцінка екологічної безпеки процесу виготовлення виробу, його експлуатації, ремонту (модернізації), та утилізації здійснюється з використанням функції Харрінгтона яка в загальному вигляді описується наступною моделлю [10]:

$$D = \sum_{k=1}^n a_k \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n D_k^{a_k}},$$

де D_k – узагальнена функція бажаності по екологічній безпеці для k -го, виробничого процесу, що має вагу a_k ; n – загальна кількість технологічних процесів у виробництві.

При цьому прийняте рішення на кожному етапі життєвого циклу виробу має вигляд функції:

$$D_k = \sum_{i=1}^m a_i \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m d_i^{a_i}}, \quad (1)$$

де d_i – часткова функція бажаності екологічної безпеки i -го прийнятого рішення, яке має вагу a_i ; m – кількість реалізованих рішень в межах окремого етапу життєвого циклу виробу.

Критерій надійності роботи обладнання теж повинен розглядатися з точки зору життєвого циклу виробу, так як показники експлуатаційної надійності обладнання закладаються на етапі конструкторсько-технологічної підготовки, забезпечуються під час виготовлення виробу, контролюються в період його експлуатації, та дотримуються під час ремонту та модернізації, що в сукупності продовжує термін роботи обладнання до видову із експлуатації.

В якості економічного критерію, як правило, використовують технологічну собівартість. На рисунку 4 наведена мережева модель прийняття рішень, що реалізуються n методами в середині m -го етапу реалізації. В якості вузлів в моделі виступають методи, а ребрами є собівартість їх реалізації.

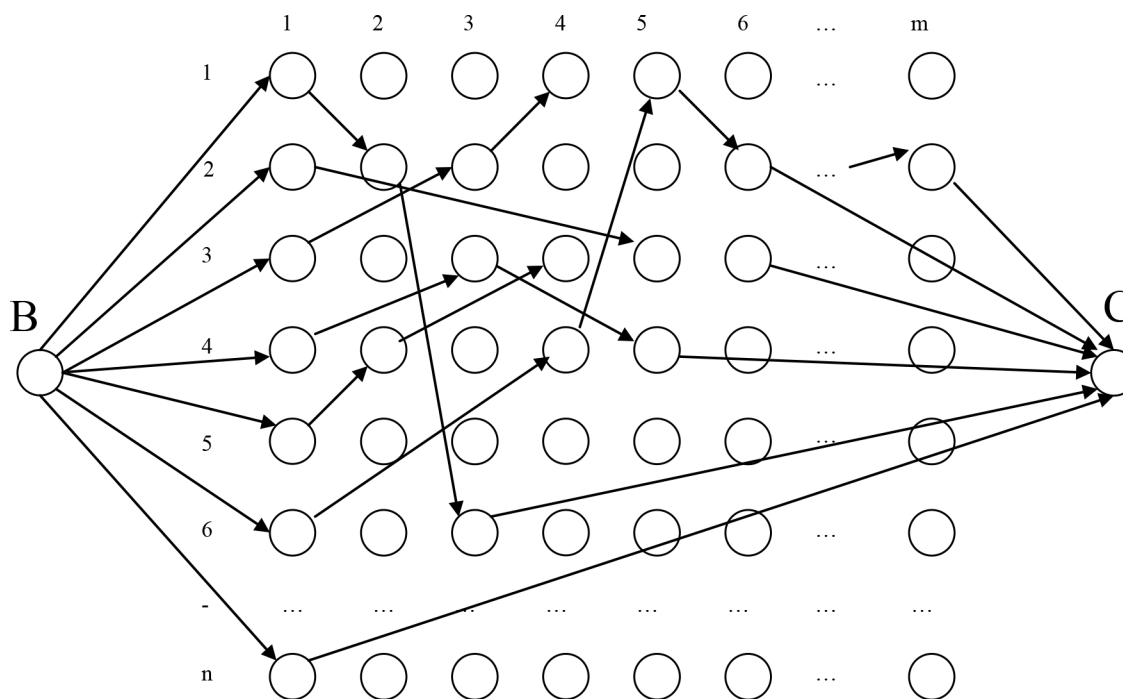


Рис. 4. Мережева модель пошуку раціонального рішення

Оптимізаційна задача в такій моделі вирішується методом лінійного програмування, тобто пошуку шляху із мінімальною сукупною собівартістю.

При оптимізації, як вагова функція, виступає саме технологічна собівартість (ω), яка додається на кожному етапі, в залежності від кількості відрізків та їх ваги, де повний шлях буде дорівнювати сукупності всіх ребер, що в нього входять $p = \langle v_0, v_1, \dots, v_k \rangle$. В загальному вигляді функція представляється як:

$$\omega(p) = \sum_{i=1}^k \omega(v_{i-1}, v_i).$$

Пошук шляху від витoku B до стоку C , який має найменшу вагу визначається залежністю:

$$\delta(B, C) = \begin{cases} \min \{ \omega(p) : B \xrightarrow{p} C \}, & \text{якщо є шлях } B, C \\ \infty, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Найкоротшим є шлях, сукупна вага якого відповідає залежності:

$$\omega(p) = \delta(B, C).$$

В цьому випадку критерій оптимізації буде мати вигляд:

$$\omega = f(\alpha, \lambda),$$

де α – параметр, який залежить від методу та підлягає керуванню; λ – технологічні обмеження при реалізації конкретного методу.

При оцінці екологічної безпечності процесу теж можна використовувати мережеву модель, яка наведена на рис. 4, але в цьому випадку ваговою функцією (χ) буде функція бажаності Харрінгтона (1), яка змінює

своє значення в діапазоні від 0 до 1. Де «1» дорівнює найвищому рівню екологічної безпеки, а «0» відповідно найнижчому рівню, тобто максимально небезпечному процесу. І оптимізаційна задача зводиться до пошуку найдовшого шляху. В цьому випадку шлях $p = \langle \eta_0, \eta_1, \dots, \eta_k \rangle$ буде визначатися загальною сумою ваги ребер:

$$\chi(p) = \sum_{i=1}^k \chi(\eta_{i-1}, \eta_i).$$

Тоді найдовший шлях від витoku B до стоку C визначається згідно залежності:

$$\beta(B, C) = \begin{cases} \max \{ \chi(p) : B \xrightarrow{p} C \}, & \text{якщо є шлях } B, C \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Найдовшим буде шлях, сукупна вага якого відповідає залежності:

$$\chi(p) = \beta(B, C).$$

Задачу пошуку оптимального варіанта вирішують комплексно, з урахуванням як економічної так і екологічної складової.

На технологічному рівні задача пошуку варіанта рішення буде виконуватися згідно умови:

$$\begin{aligned} (\exists \psi \in \Theta) R(\psi) &= \bigcap_{\zeta=1}^m E^{\zeta} \{S_i\} \vee (\exists \varphi \in \Phi) M(\varphi) \vee \\ &\vee (\exists \xi \in \Theta) O(\xi) \vee (\exists \tau \in \gamma) T(\tau) \vee (\exists \mu \in \mathfrak{D}) \Phi(\mu), \end{aligned}$$

$\mathfrak{D} \neq Co$

де $(\exists \psi \in \Theta) R(\psi)$ – квантор існування (існує хоча б один варіант вирішення завдання); $\bigcap_{\zeta=1}^m E^{\zeta} \{S_i\}$ – сукупність етапів розв’язання задачі; $(\exists \varphi \in \Phi) M(\varphi)$, $(\exists \xi \in \Theta) O(\xi)$, $(\exists \tau \in \gamma) T(\tau)$ – наявність в кожному етапі хоча б одного методу вирішення задачі, який можна реалізувати на існуючому технологічному обладнанні, що має відповідні технологічні режими.

Окремою вимогою процесу виготовлення насосів АЕС, та їх деталей, що працюють в умовах радіаційного опромінення є те, що всі матеріали, які застосовуються при їх виготовленні, ремонту та модернізації не повинні містити кобальт (Co) як в чистому вигляді, так і в сполуках. Тобто повинний існувати хоча б один варіант сукупності таких матеріалів, необхідних для реалізації технології – $(\exists \mu \in \mathfrak{D}) \Phi(\mu)$.

Як технологічне обмеження, виступає якість процесу, тобто на результат включення рішення до множини рішень, що підлягають реалізації впливає здатність забезпечення необхідного рівня показників якості:

$$(\forall \zeta \in \Xi) R(\zeta) = \{R \mid q_R^{\min} \leq q_R \leq q_R^{\max}\},$$

тобто критерії якості процесу повинні знаходитися в області допустимих значень $q_R^{\min} \leq q_R \leq q_R^{\max}$.

Включення варіанту рішення задачі в множину варіантів, що підлягають реалізації відбувається також із врахуванням екологічної безпеки процесу та експлуатаційної надійності виробу:

$$(\forall \varepsilon \in E) R(\varepsilon) = \left\{ R \mid \begin{array}{l} 0 \leq \chi_R \leq 1 \\ \chi_R \rightarrow 1 \end{array} \right\}, \quad (\forall \varpi \in \Lambda) R(\varpi) = \left\{ R \mid \begin{array}{l} 0 \leq P_R \leq 1 \\ P_R \rightarrow 1 \end{array} \right\}$$

де для всіх варіантів реалізації технології закладені критерії, щодо екологічної безпеки процесу, та експлуатаційної надійності виробів повинні знаходитися в межах: $0 \leq \chi_R \leq 1$ та $0 \leq P_R \leq 1$ відповідно, при цьому показники повинні бути наближеними до «1». Остаточною вимогою до множини рішень буде:

$$\{C_R\} = \bigcup_{k \in X} C_R(k) \left\{ \begin{array}{l} (\exists \psi \in \Theta) R(\psi) = \bigcap_{\zeta=1}^m E^{\zeta} \{S_i\} \vee (\exists \varphi \in \Phi) M(\varphi) \vee \\ \vee (\exists \xi \in \Theta) O(\xi) \vee (\exists \tau \in \gamma) T(\tau) \vee (\exists \mu \in \mathfrak{D}) \Phi(\mu), \\ (\forall \zeta \in \Xi) R(\zeta) = \{R \mid q_R^{\max} \leq q_R \leq q_R^{\max}\}, \\ (\forall \varepsilon \in E) R(\varepsilon) = \left\{ R \mid \begin{array}{l} 0 \leq \chi_R \leq 1 \\ \chi_R \rightarrow 1 \end{array} \right\} \\ (\forall \varpi \in \Lambda) R(\varpi) = \left\{ R \mid \begin{array}{l} 0 \leq P_R \leq 1 \\ P_R \rightarrow 1 \end{array} \right\} \end{array} \right\}.$$

Тоді оптимізаційна задача за економічним критерієм описується математичною моделлю:

$$R^{opt} = \lim_{C \rightarrow \min} \sum_{k=1}^n C_R^k \left| \begin{array}{l} R \in \Psi \{R_0(r_i)\} \\ q_{\varepsilon} \in \{q_R\}; q_R^{\max} \leq q_R \leq q_R^{\max} \\ \chi_{\varepsilon} \in \{\chi_R\}; \chi_R \rightarrow 1 \\ P_{\varepsilon} \in \{P_R\}; P_R \rightarrow 1 \end{array} \right.$$

З множини відібраних варіантів рішення, що відповідають умовам, обирається той, що має мінімальну сумарну технологічну собівартість по всім етапам життєвого циклу виробу.

Слід відмітити, що оптимізація може бути структурною, коли оптимізується кількість задіяних методів або нанесених на поверхню шарів покриття, а також параметричною оптимізацією, коли оптимізуються параметри технологій, які беруть участь в формуванні поверхні із заданими властивостями.

Використання системи спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхонь деталей дозволяє уникнути застосування при формуванні покриттів деталей елементів, які при опроміненні стають джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів. Насамперед, це стосується кобальту. При утилізації потрібно не тільки зберегти усі важливі матеріали, а і забезпечити екологічну безпеку при похованні шкідливих речовин.

Висновки

1. Ґрунтуючись на проведених теоретичних дослідженнях розроблена формалізована модель генерації раціональних варіантів технологій виготовлення деталей насосів АЕС, яка враховує кожний етап життєвого циклу виробу, та дозволяє сформувати множину раціональних рішень, з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій.

2. Розроблено метод синтезу варіантів технологій досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, який враховує вимоги по надійності роботи обладнання та його екологічній безпечності.

3. Розроблена система спрямованого вибору раціонального варіанту вибору технології виготовлення деталей насосів, яка дозволяє забезпечити необхідну якість робочих поверхонь найбільш економічними методами.

Список використаної літератури

1. Nuclear Power Plant Maintenance: Impact on Longevity. Режим доступу: <https://www.dombor.com/fr/nuclear-power-plant-maintenance/>
2. Operation and maintenance of nuclear power plants. Режим доступу: <https://www.iaea.org/topics/operation-and-maintenance>
3. Майфат М.М. Технологічне забезпечення захисту деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, високоефективними взаємодоповнюючими комбінованими методами: дис. ... канд. техн. наук: 133-Галузеве машинобудування. Суми, 2024. 200 с.
4. Лапковський С.В., Солдатова М.О., Трудько І.С. Відпрацювання конструкції виробу на технологічність – один із найважливіших етапів технологічної підготовки виробництва. *Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. № 63. С. 203–207.
5. Гушин О.В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: посібник. Краматорськ : ДДМА, 2019. 159 с.
6. Коноплянченко Є.В., Чибіряк Я.І., Колодненко В.М. Особливості застосування часового резервування при забезпеченні надійності складних систем. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 21–28.
7. Тарельник Н.В. Удосконалення технології електроіскрового легування деталей насосів атомних електростанцій. *ВІСНИК ХНТУ*. 2024. № 3(90). С. 141–146. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.18>
8. Тарельник Н.В. Проблеми і перспективи розробки технології модифікації поверхонь деталей насосів атомних електростанцій. *Вісник СНАУ*. 2024. № 3(57). С. 32–42. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3>
9. Носовский А.В., Алексеева З.М., Борозенец Г.П. Поводження з радіоактивними відходами. – К. : Техніка, 2007. С. 84–135.
10. Дубницький В.Ю., Кобилін А.М., Кобилін О.А., Кушнерук Ю.І., Ходирєв О.І. Обчислення значень функції Харрінгтона (функції бажаності) при інтервальному визначенні її аргументів. *Сучасні інформаційні системи*. 2023. Т. 7, № 1. С. 71–81. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_5_21

References

1. Nuclear Power Plant Maintenance: Impact on Longevity. Retrieved from: <https://www.dombor.com/fr/nuclear-power-plant-maintenance/>

2. Operation and maintenance of nuclear power plants. Retrieved from: <https://www.iaea.org/topics/operation-and-maintenance>
3. Maifat M.M. (2024) Tekhnologichne zabezpechennia zakhystu detalei mashyn, shcho pratsiuiut v umovakh hidroabrazyvnoho znoshuvannia, vysokoeфекtyvnymy vzaiemodopovniuiuchymy kombinovanyimy metodamy [Technological support for the protection of machine parts operating in conditions of hydroabrasive wear by highly effective complementary combined methods]: dys. kand. tekhn. nauk: 133-Haluzeve mashynobuduvannia. Sumy, 200 p.
4. Lapkovskyi S.V., Soldatova M.O., Trudko I.S. (2011) Vidpratsiuvannia konstrukttsii vyrobu na tekhnologichnist – odyin iz naivazhlyvishykh etapiv tekhnologichnoi pidhotovky vyrobnytstva [Working out the design of the product for manufacturability is one of the most important stages of technological preparation of production]. *Visnyk NTU Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. № 63. pp. 203–207.
5. Hushchyn O.V. (2019) Tekhnologichni metody vyrobnytstva zahotovok detalei mashyn [Technological methods of production of blanks of machine parts]: posibnyk. Kramatorsk: DDMA, 159 p.
6. Konoplianchenko Ye.V., Chybiriak Ya.I., Kolodnenko V.M. (2017) Osoblyvosti zastosuvannia chasovoho rezervuvannia pry zabezpechenni nadiinosti skladnykh system [Peculiarities of the use of time redundancy when ensuring the reliability of complex systems]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. № 8. pp. 21–28.
7. Tarel'nyk N.V. (2024) Udoskonalennia tekhnologii elektroiskrovoho lehuвання detalei nasosiv atomnykh elektrostantsii [Improvement of the technology of electrospray alloying of pump parts of nuclear power plants]. *VISNYK KhNTU*. № 3(90). pp. 141–146. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.18>
8. Tarel'nyk N.V. (2024) Problemy i perspektyvy rozrobky tekhnologii modyfikatsii poverkhon detalei nasosiv atomnykh elektrostantsii [Problems and prospects of developing the technology of modification of the surfaces of pump parts of nuclear power plants]. *Visnyk SNAU*. № 3(57). pp. 32–42. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3>
9. Nosovskyi A.V., Alekseiieva Z.M., Borozenets H.P. (2007) Povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy [Management of radioactive waste]. – K. : Tekhnika, pp. 84–135.
10. Dubnytskyi V.Iu., Kobylin A.M., Kobylin O.A., Kushneruk Yu.I., Khodyriev O.I. (2023) Obchyslennia znachen funktsii Kharrinhтона (funktsii bazhanosti) pry intervalnomu vyznachenni yii arhumentiv [Calculation of the values of the Harrington function (desirability function) in the interval determination of its arguments]. *Suchasni informatsiini systemy*. T. 7, № 1. pp. 71–81. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_5_21