

УДК 621.001.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.129676

ОБГРУНТУВАННЯ КІЛЬКІСНИХ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙ ТА ВУЗЛІВ

Ярош Я. Д., Цивенкова Н. М., Кухарець С. М., Голубенко А. А., Лось Л. В.

Об'єктом дослідження є складаність та ремонтпридатність конструкцій. Критерії оцінки таких важливих параметрів технологічності конструкції є надзвичайно складною проблемою процесу конструювання. Як відомо, результатом конструювання має стати втілення ідеї в формі виробу. Низька технологічність суттєво ускладнює даний процес, або взагалі унеможлиблює.

Одним з найбільш проблемних місць при визначенні критеріїв складаності та ремонтпридатності конструкцій є те, що їх перелік відрізняється залежно від конструкції. Із збільшенням числа деталей в конструкції процес визначення критеріїв та їх кількісна оцінка значно ускладнюються.

Формалізація критеріїв технологічності дозволяє звести процес оптимізації до єдиного алгоритму, який має високу ступінь автоматизації. Потенціал реалізації теорії в системах автоматизованого проектування став відправним пунктом для проведення дослідження.

Використання результатів дослідження, а саме сформульованих теорем складаності та ремонтпридатності, дозволяє оптимізувати конструкцію і оцінити результати оптимізації якісно та кількісно. Найдоцільніше застосовувати зазначені результати для конструкцій, виробництво яких передбачає серійність – масове та крупносерійне виробництво. За таких умов економічний ефект від запровадженої оптимізації найбільш відчутний.

Ще однією перевагою дослідження є відповідь на запитання – за якого найбільшого числа найменувань елементів конструкції можливе досягнення максимальної складаності та ремонтпридатності? Сформульовані висновки вносять зміну в алгоритм проектування конструкції і програмують рівень її оптимальності вже під час проектування. Саме такий підхід зменшує рівень матеріальних витрат вже на етапах проектування, технологічної підготовки виробництва, і, безпосередньо, під час виробництва.

Фактичним результатом застосування розробленої методики оптимізації є підвищення технологічності досліджуваних конструкцій від 30 до 50 %. В порівнянні з відомими аналогами, створено підґрунтя для встановлення та комплексного аналізу критеріїв технологічності як результату взаємодії складаності і ремонтпридатності.

Ключові слова: *рівень технологічності конструкцій, критерії оцінки складаності, критерії оцінки ремонтпридатності.*

1. Вступ

Досягнення високої технологічності конструкцій залишається актуальною задачею при зниженні собівартості виробів, підвищенні їх ремонтпридатності. Технологічність зумовлюється методами конструювання, – геометричним, машинобудівним, базовим і ін., – однак досконалість структури конструкцій має переважне значення для технологічності. Раціональність структури виробів відбивається в певних закономірностях, які доцільно знати конструкторам і технологам. Особливо корисними для апріорної оцінки конструкцій можуть виступати кількісні критерії, що враховують ці закономірності. Вирішенню даної наукової проблеми сприяє створення теорії, яка об'єднає і розкриє суть багатьох позитивних, але різнобічних результатів, отриманих в конструюванні. Виходячи з досвіду розвитку інших наук, дана теорія повинна бути аксіоматичною. У наш час відсутня формалізована теорія структури конструкцій машин і приладів з кількісними критеріями оцінки технологічності їх деталей та вузлів. Це перешкоджає застосуванню систем автоматизованого проектування (САПР), оскільки «ефективними» є лише ті САПР, об'єкти дослідження яких мають серйозну формалізовану теоретичну базу з розвиненим математико-логічним апаратом. В основі такої бази повинен лежати системний підхід.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є складаність та ремонтпридатність конструкцій та критерії їх оцінки.

Під складаністю виробів також маємо на увазі технологічність складання, а під ремонтпридатністю – технологічність ремонту. Обидва ці поняття пов'язані певними залежностями з кількісним складом виробів. В сукупності складаність та ремонтпридатність визначають технологічність конструкції.

Для оперування об'єктами дослідження їх треба наділити певними якісними та кількісними знаками, які є підставою для аналізу, удосконалення та порівняння. В якості таких ознак приймаємо кількісні критерії складаності та ремонтпридатності.

Кількісний критерій складаності механізмів визначається як відношення кількості можливих підмножин різних послідовностей приєднання деталей та вузлів до кількості відповідних складальних одиниць.

Кількісний критерій ремонтпридатності сформулюємо як відношення множини деталей і вузлів, які можна зняти, не знімаючи інші деталі і вузли, до загальної кількості деталей цієї складальної одиниці.

Основним проблемним місцем досліджуваних критеріїв є те, що вони залежать від кожної конкретної конструкції, до якої мають бути застосовані. Неможливо створити універсальний список критеріїв технологічності. Крім зазначеного, важливо розуміти, що із збільшенням структурних одиниць конструкції, критеріальна оцінка її технологічності значно ускладнюється. Однак нечіткий перелік якісних і кількісних критеріїв не має впливати на алгоритм їх аналізу і оптимізації. Таким чином, дослідження присвячене

формалізації процесу удосконалення конструкцій в напрямку підвищення технологічності за визначеними критеріями.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є створення апріорних кількісних критеріїв технологічності складання, ремонту та уніфікації конструкцій, за якими можна оцінити відповідність структури конструкцій заданим техніко-технологічним рівням. Це дозволить ще на етапі проектування виявляти закономірності та визначити шляхи оптимізації структури конструкцій, узгодивши їх з технологічним оснащенням, а також вводити перевірені поняття оцінки конструкцій за кількісними критеріями в стандарти.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Обґрунтувати створені апріорні кількісні критерії складаності та ремонтпридатності на основі математичного поняття «множина підмножин» шляхом доведення теореми про максимальну складаність та ремонтпридатність конструкцій за індукцією.

2. Створити кількісні критерії уніфікації, базуючись на понятті первинного елемента, і обґрунтувати їх шляхом доведення теореми про максимальну уніфікацію.

3. За отриманими критеріями відпрацювати конструкції на технологічність відповідно до вимог виробництва.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В наш час кількісні показники оцінки технологічності складання та ремонту механізмів і приладів визначають на основі базових рівнянь трудомісткості та собівартості [1–5]. Ці показники є залежними від стану технології конкретного підприємства, кваліфікації його персоналу та інших, змінних в часі чинників [5]. При такому підході показники технологічності характеризують не стільки технологічність конструкції, скільки досягнутий рівень технології та організації виробництва певного підприємства, яке спеціалізується на складанні або ремонті [5, 6]. Ці показники залежать як від типу виробництва (одиничне, серійне, крупносерійне, масове), так і від інших факторів, які, підсумовуючись, спотворюють загальну оцінку технологічності, особливо вперше освоєваних виробів [7]. Згадані показники, в силу своєї специфіки, не дозволяють кількісно оцінити технологічність виробів на стадії їх розробки [5–8]. В результаті багато недоліків, пов'язаних з технологічністю конструкцій, виявляються із запізненням, коли вже виготовлене оснащення першої черги і йде випуск продукції на підприємстві [9]. Неминучі переробки конструкцій виливаються в значні недоцільні витрати виробництва [8].

Необхідно дотримуватися і якісних критеріїв, таких як зручність доступу до різних місць виробу, можливість застосування для ремонту стандартного інструменту та ін. [10]. Проте відсутність апріорних кількісних критеріїв оцінки технологічності складання та ремонту і, отже, конструкцій їм відповідних, стримує підвищення економічних показників виробництва і експлуатації виробів [11, 12].

Систематизація результатів досліджень свідчить, що в основу технологічності складання та ремонту слід покласти такий кількісний критерій, що дозволить об'єктивно оцінити та ініціювати підвищення технологічності конструкцій вже на початкових етапах їх створення [11–13]. Дане завдання може бути вирішене шляхом встановлення складу апріорних кількісних критеріїв, виведення теорем з подальшим створенням відповідних законів.

5. Методи дослідження

При дослідженні були використані наступні теорії та наукові методи:

- теорія множин при пошуку закономірностей структури конструкцій машин і приладів та теорія груп при визначенні предикатів першого порядку;
- метод класифікації, метод скінчених елементів та формалізований метод аналізу, синтезу та оптимізації конструкцій при створенні апріорних кількісних критеріїв складаності, ремонтопридатності та уніфікації;
- аксіоматичний метод, як один із способів дедуктивної побудови наукових теорій при забезпеченні строгості цих теорій;
- метод індукції при доказі теореми про максимальну складаність та ремонтопридатність. Даний метод використано в якості логічного прийому дослідження, який дозволяє узагальнити результати дослідження рухом думки від одиничного до загального;
- метод апагогічного доказу при доведенні теореми про максимальну уніфікацію;
- метод узагальнення та оптимізації результатів при виведенні закону про складаність та ремонтопридатність та закону про уніфікацію деталей;
- системно-структурний метод при аналізі деталей конструкцій за сформульованими критеріями складаності, ремонтопридатності та уніфікації.

6. Результати дослідження

6.1. Створення та обґрунтування кількісних критеріїв теоремою про максимальну складаність та ремонтопридатність конструкцій

У роботі під складаністю виробів також маємо на увазі технологічність складання, а під ремонтопридатністю – технологічність ремонту. Обидва ці поняття будуть виходити з кількісного складу виробів.

Виконані авторами дослідження показали, що апріорні кількісні критерії складаності та ремонтопридатності можна створити на основі математичного поняття «множина підмножин (множина-ступінь)» [14–16].

Множиною-ступенем називається множина, елементами якої є всі підмножини будь-якої фіксованої множини [15–18]. Наприклад, для трьохелементної множини $A = \{a, b, c\}$ маємо [17]:

$$P(A) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}, \quad (1)$$

де $P(A)$ – множина-ступінь множини A ; \emptyset – порожня множина; a, b, c – елементи множини A .

Отже, конструкція має максимальну складаність і ремонтпридатність, якщо допускає складання/розбирання в будь-якій послідовності і забезпечує можливість встановлення/зняття кожної деталі або вузла без установки/знімання іншої деталі, вузла. Тобто в конструкції визначено порядок розташування деталей і вузлів, а послідовність складання або розбирання може бути довільною на кожному структурному рівні заданого складу виробу.

Кількісний критерій складаності механізмів та приладів (складальних одиниць) визначається як відношення потужності множини можливих (реальних) підмножин різних послідовностей приєднання деталей та вузлів до потужності множини-ступеня цих складальних одиниць:

$$K^c = \frac{m(P)^c + 1}{m(P_n)}, \quad (2)$$

де K^c – критерій складаності;

$m(P)^c$ – потужність множини реальних підмножин складальної одиниці, яку можна отримати складанням (одиницю додано щоб врахувати порожню множину, що входить в знаменник);

$m(P_n)$ – потужність множини-ступеня складальної одиниці, що визначена, виходячи лише з її складу.

Можливими (реальними) підмножинами складальної одиниці є ті підмножини, утворення яких дозволяє здійснювати процес складання. При визначенні підмножин враховуються, як правило, тільки найменування деталей і вузлів конкретної складальної одиниці. Структурні рівні в конструкції розглядаються аналогічно [16, 17].

Кількісно критерій ремонтпридатності складальної одиниці логічно визначити, як відношення потужності множини деталей і вузлів, які можна зняти, не знімаючи інші деталі і вузли, до потужності множини-ступеня цієї складальної одиниці:

$$K^p = \frac{m(P)^p + 1}{m(P_n)}, \quad (3)$$

де K^p – критерій ремонтпридатності;

$m(P)^p$ – потужність множини реальних підмножин, які можна отримати при будь-якій послідовності розбирання складальної одиниці на певному рівні, з врахуванням її самої (одиниця в чисельник додана, зважаючи на наявність в знаменнику порожньої множини);

$m(P_n)$ – потужність множини-ступеня складальної одиниці, яка підрахована, виходячи, як правило, лише з числа найменувань деталей та вузлів на даному рівні розбирання.

Теорема про максимальну складаність та ремонтпридатність конструкцій. З метою обґрунтування кількісних критеріїв доведемо наступну теорему: складальна одиниця має максимальну складаність та

ремонтпридатність, якщо побудова її структури забезпечує реальну можливість отримання на відповідних структурних рівнях всіх підмножин аналогічно множині-ступеня. Формалізований запис теореми:

$$\forall K(((m(P)^c + 1) = (m(P)^P + 1) = m(P_n)) \wedge K^c \wedge K^P) \Rightarrow (\max K^c \wedge \max K^P), \quad (4)$$

де K – будь-яка складальна одиниця.

Доказ проведемо за індукцією [19–22]. Візьмемо конструкцію вузла, що складається, наприклад, з основи, листової деталі та кріплення. Це може бути кріплення обшивки до корпусу газогенератора (рис. 1). Визначимо потужність множини-ступеня цієї складальної одиниці: $m(P_n) = 2^n$, де $m(P_4) = 2^4 = 16$.

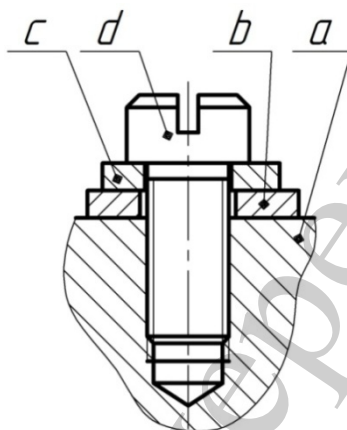


Рис. 1. Схематичне креслення простої складальної одиниці з $K^c = K^P = 0.5$:
 a – корпус газогенератора; b – обшивка термоізоляційна; c – шайба; d – гвинт

Реальне число підмножин при складанні (розбиранні) буде наступним:

$$P_{(a, b, c, d)} = \{a\}, \{d\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{b, c, d\}, \{a, b, c, d\}. \quad (5)$$

Тобто $m(P_{(a, b, c, d)}) = 7$, оскільки більшу кількість підмножин без конструктивних змін реально отримати під час складання та розбирання неможливо. Визначимо кількісний критерій складаності та ремонтпридатності розглянутого вузла:

$$K^c = K^P = \frac{m(P_{(a, b, c, d)}) + 1}{m(P_4)} = 0.5.$$

Отже, дана складальна одиниця має низьку складаність та ремонтпридатність. Якщо шайбу не встановлювати, то $K^c \cdot K^P = 0.75$. Значення критерію виросло, однак не досягло максимально можливого. Максимальний (рівний одиниці) критерій складаності та ремонтпридатності буде у випадку, коли вузол складається з двох елементів (рис. 2), або з трьох елементів при умові, що головка гвинта та отвір під неї мають спеціальну форму (рис. 3).

Деталі *b*, *c*, *d* (рис. 2) об'єднані в окремий вузол і складають один елемент. Корпус газогенератора *a* є другим елементом даної складальної одиниці. В даному варіанті дещо ускладнюється виготовлення гвинта *d*. Крім того, в обшивці *b* отвір під гвинт *d* має бути з різьбою, хоча вона може бути неповною, оскільки не є кріпильною.

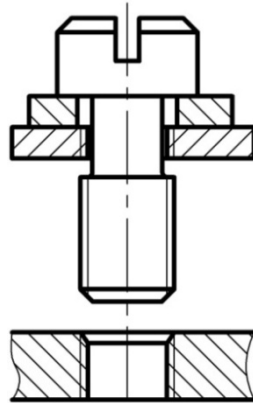


Рис. 2. Складальна одиниця, отримана перетворенням конструкції рис. 1

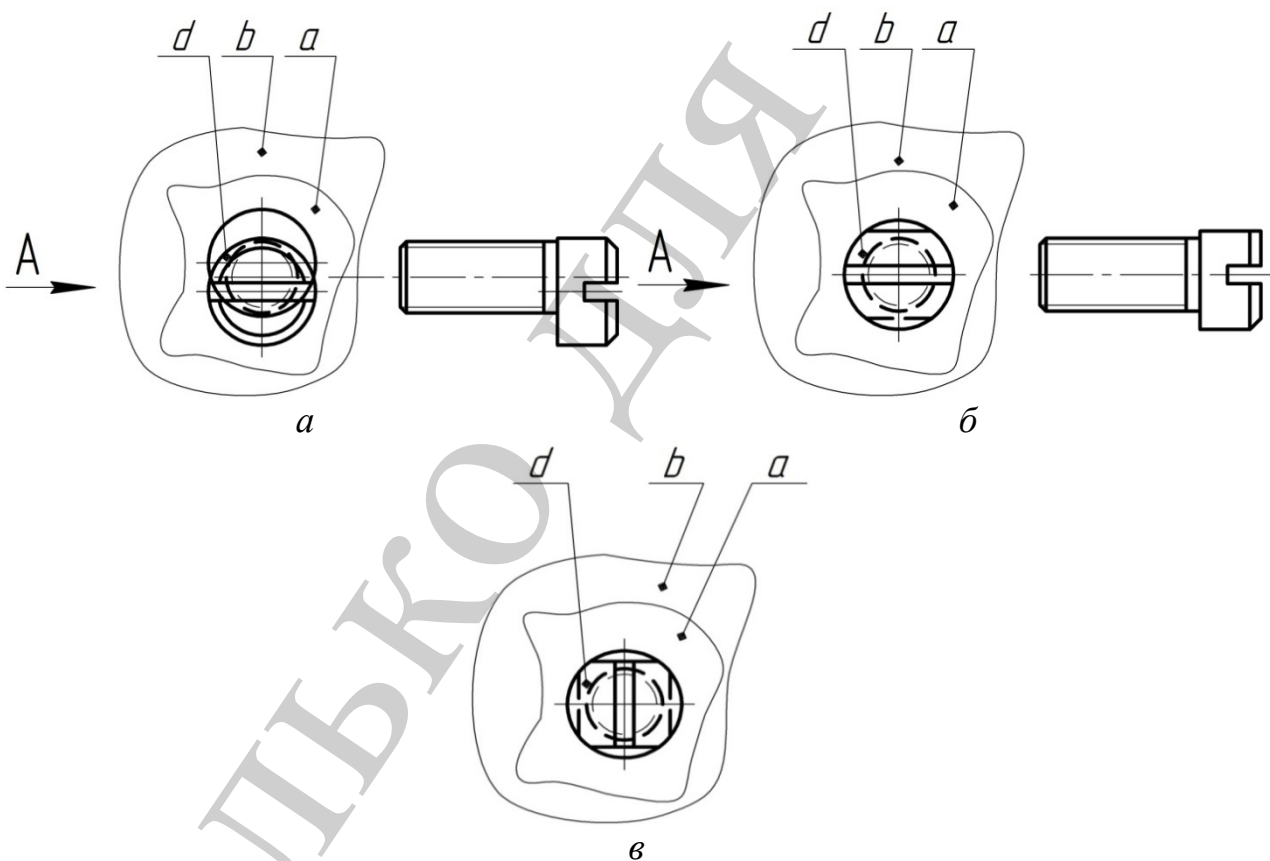


Рис. 3. Варіанти виконання кріпильного вузла $K^c=K^p=1$, де *a* – корпус газогенератора; *b* – обшивка термоізоляційна; *d* – гвинт: *a* – варіант 1; *б* – варіант 2; *в* – варіант 3

Вказану особливість можна усунути, якщо різьбу на гвинті *d* отримувати накаткою (діаметр стержня гвинта *d* в місцях, вільних від накатки, буде меншим за зовнішній діаметр різьби). Отвір під гвинт *d* в обшивці *b* слід

виконувати з невеликою відбортовкою, яка зминається при першому закручуванні гвинта d і, в подальшому, перешкоджає випаданню гвинта з отвору (рис. 4).

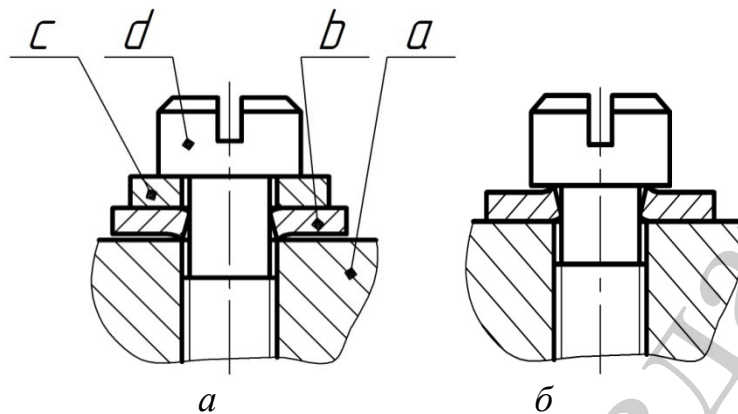


Рис. 4. Варіанти перетворень складальної одиниці, зображеної на рис. 2:
 a – корпус газогенератора; b – обшивка термоізоляційна; c – шайба; d – гвинт.
 $K^c=K^p=1$: a – варіант 1 з шайбою; b – варіант 2 без шайби

Також питання вирішується застосуванням самонарізних гвинтів. Форми головок і, відповідно, отворів під них, можуть бути різноманітними і не вичерпуватися, наведеними на рис. 3–4. Це свідчить про можливість задовольняти різні вимоги, що ставляться до складальної одиниці.

При обчисленні кількісних критеріїв число елементів в складальній одиниці враховується лише для розглянутого структурного рівня, причому однакові елементи приймають за один елемент [21, 23, 24]. Наприклад, обшивка b кріпиться чотирма гвинтами, але в підмножинах гвинт буде вважатися найменуванням, без урахування кількості цих гвинтів в конкретній складальній одиниці, на конкретному структурному рівні. В даному випадку це саме стосується і шайб, а, загалом – всіх повторюваних деталей і вузлів. Однак, якщо елемент застосовується у вузлі на тому ж самому структурному рівні, але ще і за іншим призначенням, або в складі інших елементів, то ці застосування враховуються як додаткові елементи в тих підмножинах, в які вони входять.

Отже, прослідковується тенденція, коли зі зменшенням числа деталей або вузлів, поєднаних в складальній одиниці, підвищується рівень складаності та ремонтпридатності. Наведені приклади можна розглядати в якості індуктивного підтвердження [19] можливості зменшення числа елементів або їх перегруповання по вузлах в будь-якій складальній одиниці без зниження її параметрів. Індуктивне доведення теореми вважаємо закінченим.

Слідство I. Складаність та ремонтпридатність складальної одиниці підвищуються при зменшенні її кількісного складу.

Формалізований запис слідства I:

$$\forall K(((K^c \wedge K^p) \rightarrow \max) \Rightarrow (m \rightarrow \min)), \quad (6)$$

де m – кількість найменувань деталей та/або вузлів в складальній одиниці на структурному рівні, що розглядається.

Слідство I фактично є присутнім в доказі теореми. Крім того, слід врахувати: множина-ступінь $m(P^n)$ рівна 2^n , де n – число елементів вихідної множини; тому якщо додати всього один елемент, то число варіантів складання (розбирання) збільшиться вдвічі: 2^{n+1} . Наприклад, при $n=3$, $m(P_3)=8$, при $n=4$, $m(P_4)=16$ і т. д. Тобто, число варіантів складання (розбирання), для яких в конструкції потрібно створити можливість реалізації, різко зростає і здійснити їх практично неможливо. В даному випадку під числом елементів множини-ступеня розуміють число підмножин з дотриманням закону ідемпотентності [17]. Іншими словами, рахується тільки кількість *найменувань* деталей (вузлів) в складальній одиниці, причому на конкретному структурному рівні складання (розбирання). Замість терміна «найменування деталі/вузла» в роботі також використовується термін «типорозмір» для деталей та вузлів, які функціонально виділяються і близькі за призначенням.

Слідство II. Виникає важливе під час конструювання машин і приладів запитання – за якого найбільшого числа найменувань елементів, що входять в складальну одиницю, є достовірним досягнення максимальної складаності та ремонтпридатності?

На рис. 4 представлено тернарну конструкцію, яка має максимальну складаність і ремонтпридатність. Введення шайби під головку гвинта погіршить цей параметр вдвічі. В шайбі форму отвору можна виконати відповідною голівці гвинта і, таким чином, покращити цей показник. Однак це є неприйнятним, оскільки ускладнюються процеси складання та розбирання. Якщо внести зміни (рис. 3, а, б), то на даному структурному рівні утворяться два елементи, що звичайно зробить параметр максимальним, однак не вирішить питання для розбірної конструкції з більшою кількістю елементів. Отже, при чотирьох елементах досягти максимальної складаності і ремонтпридатності є неможливим, при трьох – є можливим.

Розглянемо будь-яку більш складну конструкцію, наприклад, камеру газоутворення газогенератора для газифікації твердого палива [25]. Газогенератор складається з бункера, пов'язаного із шахтою, у нижній частині якої розташована камера газоутворення з вікнами, в яких установлені дугтьові фурми. Має варіатор, який складається з приводу, кінематично зв'язаного із штурвальними пристроями, виконаними у вигляді пневмоциліндрів. Передні кришки корпусів пневмоциліндрів з'єднані з дугтьовими фурмами. Штоки встановлені з можливістю здійснення зворотно-поступального руху вздовж осей дугтьових фурм. Фурми виконані у вигляді кульових опор і встановлені у вікнах по периметру камери щонайменше в два яруси [25].

Конструкція [25] має недостатню складаність та ремонтпридатність. Ускладненим є кріплення пневмоциліндрів, які забезпечують працездатність конструкції за високих температур. Технічно складно здійснити розташування шурника всередині фурм і забезпечити його безвідмовну роботу через потрапляння в простір між шурником та фурмою частинок палива або золи. Заявлену автором [25] можливість вільного переміщення шурника та кожної

фурми окремо з метою формування зони горіння на практиці важко реалізувати. Конструкція не передбачає здійснення контролю стану шарів палива в камері газоутворення в певний момент часу, а хаотичне переміщення фурм у відповідних зонах чинить негативний вплив на стабільність процесу газоутворення. Виготовлення такої камери є трудомістким процесом, а постійні роботи з відновлення вузлів цієї камери через часті відмови підвищують експлуатаційну вартість газогенератора в цілому.

З метою спрощення процесу складання та підвищення ремонтпридатності запропоновано конструкцію камери газоутворення [26]. Окислювальна суміш в зону піролізу надходить від системи подачі газів дуття через повітророзподільник, систему гнучких шлангів і фурми, встановлені в шарнірних опорах. Опори розташовані в один чи більше ярусів по периметру камери. Переміщення фурм здійснюється системою важелів, положення яких змінюється за допомогою керуючих дисків. Компенсація зміни довжини важеля, яка виникає в процесі переміщення, відбувається за рахунок рухомого з'єднання, представленого в [26].

В конструкції [26] циліндри замінено системою важелів, що приводяться в рух керуючими дисками. Це дає суттєву економію, оскільки відпадають вартісні операції з налагодження, підгонки та стабілізації системи. В даному випадку визначення кількісного складу враховує особливості системи подачі газів дуття по обов'язковій наявності фурм для реалізації процесу газифікації.

Для індуктивного доведення слідства II розглянутих конструкцій цілком достатньо. Будь-яку складальну одиницю, при необхідності, можна зробити тернарною і домогтися максимальної складаності і ремонтпридатності. В теорії груп [27] асоціативність закону композиції відзначається тільки для трьох елементів. Отже, слідство II може бути представлене як: тернарний склад складальної одиниці є найбільшим для отримання максимальної складаності і ремонтпридатності.

Формалізований запис слідства II:

$$\forall K((m \leq 3) \Rightarrow ((K^c \wedge K^P) = \max)). \quad (7)$$

6.2. Закон складаності та ремонтпридатності

З точки зору формальних логічних побудов формула (4) тотожно істинна, про що свідчить її схема: $(A \wedge B \wedge C) \Rightarrow (B \wedge C)$, де A заміняє вираз $(m(P)^c + 1) = (m(P)^P + 1) = m(P_n)$, а B позначає K^c , C - K^P .

Семантично істинність кількісних критеріїв у формулі (4) полягає в їх максимальному значенні. Дані критерії рівні. У формулі вони пов'язані кон'юнкцією і тому права частина формули (4) буде істинною в змістовному сенсі при найбільшому значенні обох критеріїв. Формально, для істинності імплікації необхідна істинність тільки консеквента. Таким чином, формула (4) змістовно також істинна. Зазначені властивості цієї формули свідчать про її загальну значимість, що дає підстави вважати її законом. Слідства I та II додатково підсилюють це твердження, а також вони є правилами конструювання.

Закон складаності і ремонтпридатності за структурою конструкцій можна сформулювати наступним чином:

Максимальна складаність та ремонтпридатність за структурою досягається в кожній конструкції, якщо при наявності заданого порядку розташування частин забезпечена можливість довільної послідовності складання (розбирання) відповідної складальної одиниці на даному структурному рівні.

Ілюстрацією закону є приклади в доведенні теореми і слідств. Число прикладів можна збільшити. При цьому відомі пристрої нерідко потрібно проектувати заново, і в багатьох випадках отримуємо конструкції, які містять новизну і корисність, тобто відносяться до винаходів.

Закон складаності і ремонтпридатності, не будучи методом створення винаходів, все ж ініціює розробку нової техніки, оскільки спонукає до пошуку принципів змін, спрямованих на підвищення технологічності конструкцій. Адже часто причиною неякісної роботи механізмів та пристроїв є відсутність технологічності [28, 29].

6.3. Створення та обґрунтування кількісних критеріїв уніфікації

Чинні нормативно-технічні документи та опубліковані праці з уніфікації розглядають і встановлюють вимоги, в основному, до уніфікації складальних одиниць [1, 30, 31]. Методи уніфікації деталей розроблені недостатньо.

В [3] зазначено, що уніфікація деталей повинна виходити з їх елементів, однак способи її проведення не розкриті. Відсутність всебічно обґрунтованого підходу до уніфікації деталей знижує ефективність уніфікації і складальних одиниць.

Сучасна конструкторсько-технологічна концепція тяжіє переважно до статичних форм уніфікації, які, застаріваючи, можуть чинити негативний вплив на розвиток техніки. Впровадження динамічної уніфікації, що органічно включає еволюцію своїх форм залежно від ступеня прогресу техніки, стримується відсутністю методів, в першу чергу, уніфікації деталей.

Кількісний критерій уніфікації деталей доцільно засновувати на понятті первинного елемента, як найпростішої частини, що має найнижчий структурний рівень [8]. Крім того, акцентування в уніфікації на найпростіших частинах дозволяє апріорно стверджувати про побудову елементарної теорії уніфікації. Правильність такого підходу підтверджена досвідом створення математичних теорій, які часто починалися як елементарні (елементарні арифметика, теорія чисел і т. д.).

Спочатку доведемо теорему про максимальну уніфікацію. Операція об'єднання в даному випадку представлена в теоретико-множиному сенсі [15].

Визначення теореми – якщо поелементне об'єднання деталей дорівнює одному первинному елементу, то уніфікація цих деталей буде максимальною.

Формалізований запис теореми:

$$\forall d \left(\left((d \in D \in U) \wedge \left(U D = a_0 \right) \wedge K^Y \right) \Rightarrow \left(K^Y = \max \right) \right) \quad (8)$$

де d – деталь заданого типу; D – заданий тип деталей, який розглядається на рівні їх елементів; U – основна множина; a_0 – первинний елемент; K^Y – кількісний критерій уніфікації.

Застосуємо доказ від протилежного, тобто непрямий (апагогічний) доказ. Припустимо, що вірним є заперечення теореми. Однак в техніці є безліч прикладів конструкцій деталей, кожна з яких являє собою первинний елемент, повторений кінчену кількість разів, а саме:

- циліндричні кручені пружини (без підтиснутих та оброблених витків);
- деталі, виготовлені шляхом поперечного розрізання прокату (швелери, труби);
- деталі з пластмас, утворені з заготовок, отриманих екструзією і т. п.

Первинними елементами є: у циліндричних пружин – один виток, у деталей з прокату – секція мінімальної довжини і т. д. У подібних випадках уніфікація буде максимальною, тому що можливим є отримання будь-якого типорозміру деталі. Таким чином, приходимо до протиріччя щодо заперечення теореми і, отже, стверджуємо її істинність.

Виділимо ще один момент, який, по суті, є наслідком вищевикладеної теореми: повністю оригінальною є деталь, у якій поелементний перетин з деталями одного або декількох, що беруться до уваги, типів дорівнює нулю. Тут також операція перетину представлена в теоретико-множинному сенсі [15].

Вищевикладені результати фактично імплікують наступну побудову кількісного критерію уніфікації деталей:

$$K^Y = \frac{1}{n_a} \quad (9)$$

де n_a – число первинних видів елементів в по-елементному об'єднанні деталей, що розглядаються. Наприклад, при одному первинному елементі уніфікація буде максимальною, оскільки $n_a=1$ і $K^Y=1$. При двох первинних елементах $n_a=2$ і $K^Y=0.5$, тобто уніфікація погіршилась, і т. п.

Закон уніфікації деталей. Необхідність коректності побудови теорії зумовлює перевірку отриманих результатів на наявність закономірності. Теорема про максимальну уніфікацію і імпліковані з неї слідство та критерії логічно зрозумілі. Синтаксис формули (8), її схема обумовлюють тотожну істинність. Семантично формула (8) завжди виконується, про що свідчать підстановки в неї об'єктивних даних про різні конструкції, тобто ця формула істинна в кожній структурі. Отже, є підстави стверджувати про загальну значимість для процесу уніфікації результатів, описаних моделями, що інтерпретують формулу (8). Таким чином, отриманим результатам доцільно надати форму закону про уніфікацію деталей. Визначення закону – уніфікація

деталі зростає при зменшенні числа видів первинних елементів її складових і стає максимальною при одному виді.

Досягнення максимального значення критерію уніфікації для багатьох типів деталей – складна і трудомістка задача. Тому, в прикладному аспекті, для таких типів доречно говорити про тенденції до зменшення числа видів первинних елементів в деталях, що послужить підвищенню уніфікації.

Розвиток елементної уніфікації – одна зі складових її динамічної форми. Зокрема, в нових уніфікованих деталях повинні оптимально використовуватися «старі» уніфіковані елементи. Міркуючи абстрактно можна стверджувати, що при мінімізації розмірів первинних елементів на якихось граничних рівнях утворюється елемент, з якого шляхом багаторазових повторень можна побудувати будь-яку складну деталь, дуже далеку від нинішніх уявлень про уніфіковану деталь. З огляду на це, подальші дослідження планується присвятити вимогам, яким повинен задовольняти первинний елемент з позицій технологічності, функціонування та ін.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Сильними сторонами даного дослідження є формалізація понять складаності та ремонтпридатності та пов'язаний з цим процес встановлення необхідної та достатньої кількості відповідних критеріїв. Особливо слід відзначити універсальність результатів дослідження, втілених у відповідні закони. Дія сформульованих законів складаності та ремонтпридатності охоплює не лише галузь машинобудування для конструкцій будь-якої складності, але може поширюватись на будь-які багатокомпонентні системи.

Як наслідок, використання запропонованого в дослідженні методу оптимізації конструкцій є створенням таких конструкцій машин, оптимальність яких за показниками складаності та ремонтпридатності закладається ще на етапі проектування. Крім прямих переваг в експлуатації оптимізованих механізмів та приладів, вони мають підвищену технологічність під час їх виробництва. Це впливає на життєвий цикл конструкції, скорочуючи етап виготовлення і, відповідно, знижуючи її собівартість.

Weaknesses. Слабкі сторони дослідження полягають в складності автоматизації процесу визначення та аналізу основних критеріїв складаності та ремонтпридатності. Нажаль, цей процес потребує залучення експертів, тобто втручання людського інтелекту і на даний час недостатньо алгоритмізований для використання в САПР. З іншого боку, інші етапи оптимізації можуть бути автоматизовані за рахунок використання результатів дослідження, звичайно, за наявності результатів експертної оцінки відповідних критеріїв. Крім того, запропонована теорія обмежує кількість необхідних для проведення оптимізації критеріїв, що значно спрощує роботу експертів та скорочує час на їх оцінку. Прискорення процесу проектування конструкції дозволить пришвидшити її виготовлення і, відповідно, підвищить її конкурентоспроможність за рахунок часових переваг у виході на ринки збуту.

Постійний розвиток технологій потребує постійного створення нових конструкцій механізмів і приладів, а вимоги до їх складаності та

ремонтпридатності зростають. Наприклад, складаність сьогодні все частіше визначається можливістю проведення автоматизованих, механізованих та роботизованих операцій. Те ж саме стосується і ремонту, роботи з автоматизації процесів якого постійно ведуться.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень в даному випадку мають бути зорієнтовані на можливість застосування сформульованих законів для проектування конструкцій, що виготовляються та ремонтуються в умовах сучасних та майбутніх автоматизованих та роботизованих виробництв.

Потенційна прибутковість впровадження такої технології ілюструється, перш за все, витратами часу на складання. Так, тривалість циклу складання конструкції, створеної з урахуванням запропонованих методів і законів, значно скорочується в порівнянні з конструкціями, створеними без урахування критеріїв оптимізації. Скорочення тривалості складання може сягати 30–50 %.

Threats. Основною «загрозою» на шляху впровадження результатів дослідження в життя є необхідність залучення групи експертів, кваліфікація яких в проектуванні конструкцій даного призначення має бути максимально високою. Нажаль, за відсутності загальної бази спеціалістів за галузями машинобудування, швидко підібрати експертну групу достатньо складно. Крім того, залучення експертів пов'язане з додатковими витратами, величина яких значно зростає із підвищенням вимог до їх кваліфікації. Шляхи подолання цієї загрози пов'язані із подальшими дослідженнями та створенням ряду алгоритмів автоматизованої оцінки кількісних критеріїв для типових конструкцій і конструкцій, що походять з них.

8. Висновки

1. Створено апріорні кількісні критерії складеності і ремонтпридатності на основі математичного поняття «множина підмножин». Дані критерії дозволяють кількісно оцінити технологічність виробів ще на стадії їх проектування і не залежать від змін в часі чинників, таких як технології конкретного підприємства, кваліфікація персоналу і т. д. Для обґрунтування кількісних критеріїв доведено теорему про максимальну складаність і ремонтпридатність конструкцій з слідствами I та II за індукцією. Висока значимість теореми дозволяє вважати її законом. Слідства I і II, будучи правилами конструювання, додатково підсилюють це твердження. Відмінною характеристикою закону є те, що, не будучи методом створення винаходів, він ініціює розробку нової техніки, бо для отримання апріорних критеріїв спонукає до пошуку принципових змін, спрямованих на підвищення технологічності конструкцій.

2. Розкрито способи проведення уніфікації деталей. Отримано кількісні критерії уніфікації деталей, засновані на понятті первинного елемента, що має найнижчий структурний рівень. Запропоновано апагогічний доказ теореми про максимальну уніфікацію. Встановлено, що повністю оригінальною є деталь, у якій поелементний перетин з деталями одного або декількох типів, що беруться до уваги, дорівнює нулю. Проведена перевірка теореми і імплікованих з неї наслідків на наявність закономірності. Синтаксис отриманої формули, її схема

зумовили тотожну істинність, семантично вона завжди виконується, про що свідчать отримані практичні результати. Загальна значимість отриманих результатів для процесу уніфікації деталей дозволяє втілити їх у формі закону про уніфікацію деталей.

3. Отримані результати дозволили стверджувати, що при мінімізації розмірів первинних елементів на якихось граничних рівнях утворюється елемент, з якого шляхом багаторазових повторень можна побудувати будь-яку складну деталь, відповідну поставленим з позицій технологічності і функціонування вимогам:

- номенклатури агрегатного монтажу механізмів та приладів;
- впровадження систем модульного проектування з урахуванням типізації та уніфікації;
- використання САПР, які забезпечують заданий рівень аналізу варіантів конструктивних рішень при різних схемах їх використання.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості створення на основі кількісних критеріїв автоматизованої системи експертного вибору оптимальної базової конструкції з максимальним потенціалом до функціональних удосконалень, з подальшим визначенням комплексного показника технологічності. Дана система може бути частиною загальновиробничої системи, яка забезпечить можливість керування якістю продукції, та може бути вбудована в інтегровані системи САМ/CAD. Використання даної системи забезпечить зменшення трудомісткості оцінювання конструкцій на технологічність не залежно від етапу їх створення та скоротити витрати та терміни технологічної підготовки виробництва вперше освоєваних виробів.

References

1. DSTU ISO 9001-95 (GOST 14.202-73). Systemy yakosti. Model zabezpechennia yakosti v protsesi proektuvannia, rozroblennia, montazhu ta obsluhovuvannia. Introduced from July 1, 1996. Kyiv, 1996. 30 p.
2. DSTU 3974-2000 (GOST 14.201-73). Systemy rozroblennia ta postavlennia produktsii na vyrobnytstvo. Pravyly vykonannia doslidno-konstruktorskykh robit. Introduced from November 27, 2000. Kyiv, 2000. 38 p.
3. DSTU 3021-95. Vyprovovuvannia i kontrol yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia. Introduced from January 1, 1996. Kyiv, 1996. 73 p.
4. DSTU 3278-95. Systema rozroblennia i postavlennia produktsii na vyrobnytstvo. Osnovni terminy ta vyznachennia. Introduced from February 27, 1995. Kyiv, 1997. 64 p.
5. Enke J., Glass R., Metternich J. Introducing a Maturity Model for Learning Factories // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 9. P. 1–8. doi:[10.1016/j.promfg.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.010)
6. Learning Factories for Research, Education, and Training / Abele E. et al. // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 32. P. 1–6. doi:[10.1016/j.procir.2015.02.187](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187)

7. Materials discovery and design using machine learning / Liu Y. et al. // Journal of Materiomics. 2017. Vol. 3, No. 3. P. 159–177. doi:[10.1016/j.jmat.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jmat.2017.08.002)
8. Substantiation of the structure theory of design of technological machines and devices / Los L. et al. // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 5, No. 1 (37). P. 48–55. doi:[10.15587/2312-8372.2017.113003](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.113003)
9. Moldavska A., Martinsen K. Defining Sustainable Manufacturing Using a Concept of Attractor as a Metaphor // Procedia CIRP. 2018. Vol. 67. P. 93–97. doi:[10.1016/j.procir.2017.12.182](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.182)
10. Vasilevskiy O. M., Ihnatenko O. H. Normuvannia pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv: handbook. Vinnytsia: VNTU, 2013. 160 p.
11. Knowledge-based design for assembly in agile manufacturing by using Data Mining methods / Kretschmer R. et al. // Advanced Engineering Informatics. 2017. Vol. 33. P. 285–299. doi:[10.1016/j.aei.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.12.006)
12. Chapra S., Canale R. Numerical Methods for Engineers. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 992 p.
13. Stock T., Kohl H. Perspectives for International Engineering Education: Sustainable-oriented and Transnational Teaching and Learning // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 10–17. doi:[10.1016/j.promfg.2018.02.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.089)
14. Stratulat S. Mechanically certifying formula-based Noetherian induction reasoning // Journal of Symbolic Computation. 2017. Vol. 80. P. 209–249. doi:[10.1016/j.jsc.2016.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jsc.2016.07.014)
15. Aleksandrov P. S. Vvedenie v teoriyu mnozhestv i obshchuyu topologiyu. Moscow: Nauka, 1977. 368 p.
16. Liu Z. The epistemological basis of industrial designing // Design Studies. 1991. Vol. 12, No. 2. P. 109–113. doi:[10.1016/0142-694x\(91\)90053-y](https://doi.org/10.1016/0142-694x(91)90053-y)
17. Sigorskiy V. P. Matematicheskiy apparat inzhenera. Kyiv: Tekhnika, 1975. 768 p.
18. Cattaneo M. E. G. V. The likelihood interpretation as the foundation of fuzzy set theory // International Journal of Approximate Reasoning. 2017. Vol. 90. P. 333–340. doi:[10.1016/j.ijar.2017.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ijar.2017.08.006)
19. Kaufman A., Itskovich G. Geometrical Factor Theory of Induction Logging // Basic Principles of Induction Logging. 2017. P. 173–226. doi:[10.1016/b978-0-12-802583-3.00006-x](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802583-3.00006-x)
20. Kuru S., Negro J., Ragnisco O. The Perlick system type I: From the algebra of symmetries to the geometry of the trajectories // Physics Letters A. 2017. Vol. 381, No. 39. P. 3355–3363. doi:[10.1016/j.physleta.2017.08.042](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.08.042)
21. Lavrov I., Maksimova L. Problems in Set Theory, Mathematical Logic and the Theory of Algorithms / ed. by Corsi G. Springer, 2003. 282 p. doi:[10.1007/978-1-4615-0185-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0185-5)
22. Maciejewski A. J., Przybylska M., Tsiganov A. V. On algebraic construction of certain integrable and super-integrable systems // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2011. Vol. 240, No. 18. P. 1426–1448. doi:[10.1016/j.physd.2011.05.020](https://doi.org/10.1016/j.physd.2011.05.020)

23. Demin D. A. Mathematical description typification in the problems of synthesis of optimal controller of foundry technological parameters // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 1, No. 4 (67). P. 43–56. doi:[10.15587/1729-4061.2014.21203](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21203)

24. Zyelyk Y. I. Convergence of a matrix gradient algorithm of solution of extremal problem under constraints // Journal of Automation and Information Sciences. 2000. Vol. 32, No. 9. P. 34–41.

25. Hazohenerator dlia hazyfikatsii tverdoho palyva: Patent No. 75529 UA, MPK S10J3/20, C10J3/32 / Poltavets V. I., Yaziev A. S. Appl. No. u20040907430. Filed: 10.09.2004. Published: 17.04.2006, Bull. No. 4.

26. Sposib formuvannia zony horinnia i hazyfikatsii ta hazohenerator dlia yoho zdiisnennia: Patent No. 107219 UA, MPK S10J3/20, C10J3/32, B01J7/00, F23C7/00 / Tsyvenkova N. M., Holubenko A. A. Appl. No. a201211797. Filed: 12.10.2012. Published: 10.12.2014, Bull. No. 23.

27. Kargapolov M. I., Merzlyakov Yu. I. Osnovy teorii grupp. Moscow: Nauka, 1977. 240 p.

28. Pokras O. Analysis of the Ukrainian instrument-making industry international competitiveness using porter's diamond // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 4, No. 5 (36). P. 31–36. doi:[10.15587/2312-8372.2017.109114](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109114)

29. Matviichuk I. Modern state and prospects for development of instrument-making industry in Ukraine // Global and National Problems of Economy. 2015. No. 3. P. 360–365.

30. Borisov V. M., Borisov S. B. Otsenka urovnya standartizatsii i unifikatsii izdeliy mashinostroeniya // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2016. Vol. 19, No. 3. P. 93–94.

31. Tipovaya metodika opredeleniya urovnya standartizatsii i unifikatsii izdeliy RD 33-74. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1975. 42 p.