

Алгоритмізація комбінованого підходу до синтезу інженерних рішень

О. В. Литвин¹ • С. Б. Паньков¹ • І. Р. Ящук¹

Received: 3 August 2020 / Accepted: 24 November 2020

Анотація. У даній статті приділена увага вирішенню проблеми проектування нових, більш адаптованих і універсальних технічних об'єктів, які пов'язані з концептуальним проектуванням складних конструктивних елементів, та потребують аналізу й оцінювання великої кількості можливих альтернатив. Для вирішення даної проблеми постає актуальна задача створення нових, та вдосконалення існуючих методів пошуку інженерних рішень, які дозволять ефективно вирішувати задачу синтезу технічних рішень із застосуванням сучасних технологій. Рішення поставленої задачі представлено у даній статті, в якій запропоновано комбінований підхід до синтезу інженерних рішень, на основі класичного методу морфологічного дослідження (для формування множини альтернатив) та нейромережевої технології (для формування раціонального технічного рішення). У статті представлено розроблений алгоритм роботи блоку інтелектуального прийняття рішень, що забезпечує процес синтезу інженерних рішень інтелектуальною складовою та розширює технічний рівень розроблених функціональних вузлів, скорочуючи при цьому час їх проектування. У роботі представлена розроблена структурно-функціональна модель синтезу інженерних рішень, на основі запропонованого комбінованого підходу.

Ключові слова: синтез; технічне рішення; проектування; винахідництво; машинобудування; оптимізація; нейронна мережа.

Вступ

Машинобудівна галузь відіграє ключову роль у зростанні економіки та формуванні фундаменту для розвитку науково-технічного прогресу країни. У сучасних умовах, світова спільнота починає оговтуватися від колапсу, спричиненим внаслідок недавнього світового спалаху COVID-19 та адаптувати галузь виробництва до сьогоднішніх реалій (пошук нових ринків сировини, автоматизація, роботизація і комп'ютеризація процесів проектування та виробництва, швидке адаптування та перепрофілювання технологічного обладнання для виробництва необхідної продукції, створення нових і вдосконалення існуючих функціональних одиниць та конструкцій, перехід на нові джерела енергії тощо). Машинобудівна галузь одна із

перших адаптовується до запитів суспільства, оскільки відіграє важливу роль у створенні та вдосконаленні матеріально-технічної бази виробництва. Для машинобудування України даний виклик буде поштовхом до нового етапу розвитку після багаторічного застою. Також слід відмітити позитивний момент для машинобудівної галузі України прийнятий законопроект щодо створення передумов для сталого розвитку та модернізації вітчизняної промисловості, який регламентує частку складової українського виробництва в чотирьох галузях державних закупівель.

Так, виникає потреба, у короткі терміни, створити необхідні умови для швидкого налагодження виробництва дефіцитного продукту. Одним із першочергових завдань є створення та адаптування технічних об'єктів виробництва та проектування інженерних рішень необхідної продукції. Це вимагає вирішення задачі проектування нових, більш адаптованих і універсальних технічних об'єктів, пов'язаних з концептуальним проектуванням складних конструктивних елементів, які потребують аналізу та оцінювання великої кількості можливих альтернатив. З цих причин стає актуальною задача створення нових, та вдосконалення

✉ О. В. Литвин
litvinkpi@gmail.com

✉ С. Б. Паньков
sbp0125@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

існуючих методів пошуку інженерних рішень, які дозволять ефективно вирішувати задачу синтезу нових, більш ефективних і гнучких технічних рішень із застосуванням сучасних технологій.

У численній літературі, присвяченій проектуванню та технічній творчості, детально розглядаються методи і правила пошуку ідей рішення інженерних задач. Вони дозволяють підвищити ефективність як індивідуальної творчої роботи конструктора, так і ефективність творчої діяльності колективу розробників. Існує велика кількість методів пошуку інженерних рішень, які розрізняються рівнем складності, ступенем автоматизації та специфікою застосування. Серед них для синтезу оптимальних структур функціональних вузлів найбільш адаптовані та застосовувані є морфологічні методи дослідження [1].

Морфологічний аналіз і синтез, в більшості випадків, здійснюється на початкових етапах проектування, для оцінки і систематизування усіх можливих варіантів реалізації структури та вибору оптимального технічного рішення [1, 2]. Також він застосовується для рішення задач технологічного передбачення, завдяки можливості побудови стратегії прийняття рішень, зокрема, в задачах створення нових складних технічних систем [3]. На основі даного методу ґрунтуються багато різних підходів, які знайшли своє використання при синтезі інженерних рішень у машинобудуванні. У роботі [4] запропонований генетико-морфологічний підхід для проектування затискних механізмів верстатів. Подальшим удосконаленням структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій були результати опублікованих робіт [5, 6], в яких наведена загальна класифікація багатокритеріальних задач та представлений загальний підхід до пошуку оптимального розв'язку таких задач. У роботах [7, 8] приведений синтез на основі математичної моделі з визначенням раціональної структури і параметрів конструкції.

Метою дослідження є створення методики синтезу інженерних рішень з урахуванням особливостей їх застосування, що забезпечує високу ефективність пошуку раціональних конструкцій в процесі оптимального проектування з використанням класичних методів та сучасних інформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані і вирішені наступні завдання:

- розробити структуру комбінованого підходу синтезу інженерних рішень на основі класичного методу морфологічного дослідження та нейромережевої технології;
- встановити функціональні взаємозв'язки основних складових розробленої структури;
- розробити алгоритм роботи інтелектуального блоку прийняття рішень;

- розробити структурно-функціональну модель синтезу інженерних рішень на основі запропонованого комбінованого підходу.

Розробка передумов алгоритмізації комбінованого підходу до синтезу технічних рішень на основі морфологічного дослідження з використанням нейронної мережі складає наукову новизну роботи.

Результати досліджень

На сьогоднішній день впровадження нових технологій у різних галузях не обходиться без застосування машинного навчання. Нейромережеві технології знайшли своє застосування в медицині, економіці, виробництві, робототехніці та багатьох інших областях науки і техніки для розв'язання задач пов'язаних з кластеризацією, прогнозуванням, класифікацією, апроксимацією, розпізнаванням образів тощо [9, 10].

Застосування нейромережевої технології у задачах технічної творчості, забезпечить процес синтезу інженерних рішень інтелектуальною складовою та дозволить розширити технічний рівень розроблених функціональних вузлів, скорочуючи при цьому час їх проектування [11]. Дана технологія належить до суб'єктивних моделей оцінки та прогнозування розроблених рішень, оскільки її робота ґрунтується на основі експертних оцінок, що дозволяє впровадити в технічне рішення (ТР) алгоритмічні розрахунки з елементами, притаманних інженеру, складових інтуїції та досвіду, які нерідко стають головними та визначальними у процесі прийняття рішення.

Запропонований комбінований підхід для процесу синтезу інженерних рішень в основі має класичний метод морфологічного дослідження (для формування множини альтернатив) та нейромережеву технологію (для формування та рекомендації раціонального технічного рішення). Структура процесу синтезу на основі комбінованого підходу наведена на рис. 1.

Основні складові блоки процесу синтезу інженерних рішень (А) наведені у табл. 1.

Застосування методу морфологічного дослідження (морфологічний аналіз та синтез) для формування морфологічної таблиці (А₃) дозволяє [1]:

- провести системне дослідження всіх можливих варіантів рішення задачі, які впливають із закономірності будови (морфології) створюваного або вдосконалюваного об'єкта, що дозволяє врахувати незвичайні варіанти, які при звичайному переборі могли бути упущені дослідниками;
- реалізувати сукупність операцій пошуку на морфологічній множині варіантів опису функціональних систем, які відповідають вихідним вимогам, тобто умові задачі.

Морфологічна множина варіантів опису функціональних систем представлена морфологічною таблицею (табл. 2) [12].

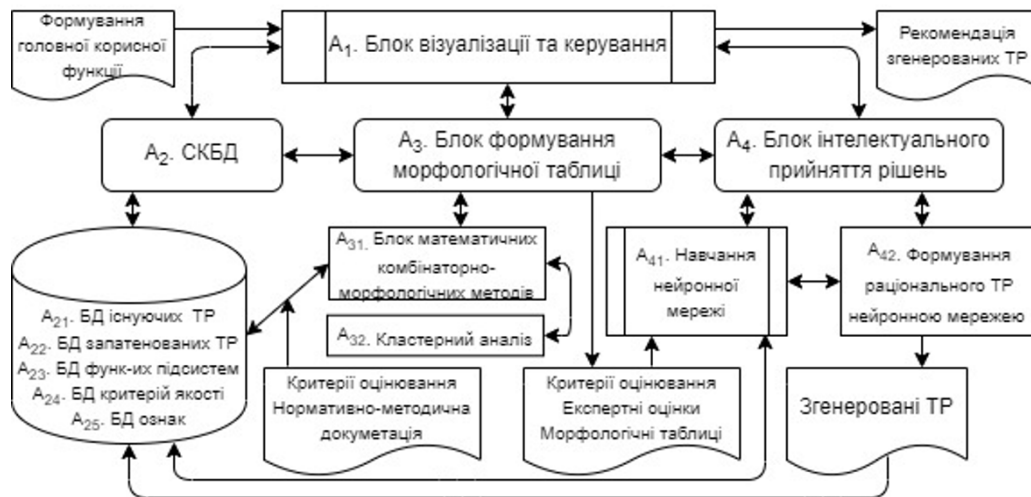


Рис. 1. Структура процесу синтезу інженерних рішень на основі комбінованого підходу

Таблиця 1. Складові блоки процесу синтезу інженерних рішень (А)

Складова одиниця	Функція
А1. Блок візуалізації та керування	забезпечення візуалізації та інтерактивної взаємодії користувача із системою
А2. СКБД (система керування базами даних)	забезпечення керування базами даних (БД), взаємодія з користувачем та іншими складовими системи
А21. БД існуючих ТР	база знань існуючих, запатентованих та згенерованих ТР необхідна для накопичення досвіду з метою його подальшого використання у розв’язанні типових аналогічних задач проєктування
А22. БД запатентованих ТР	
А23. БД функціональних підсистем	
А24. БД критеріїв якості	
А25. БД ознак	
А3. Блок формування морфологічної таблиці	формується на основі БД ознак, є основною при формуванні морфологічної таблиці
А4. Блок інтелектуального прийняття рішень	використовується для вибору із неї необхідних критеріїв для оцінки альтернатив функціональних підсистем відповідно до головної цілі
А31. Блок математичних комбінаторно-морфологічних методів	вміщує інформацію про функціональні та конструктивні ознаки та їх згруповану множину альтернатив, відповідно функціональним підсистем
А32. Кластерний аналіз	забезпечує формування морфологічної таблиці у ручному або автоматичному режимі
Критерії оцінювання Нормативно-методична документація	використовується для автоматичного формування морфологічної таблиці та багатокритеріальної оцінки множини альтернатив функціональних підсистем із якої формується цілісні / раціональні варіанти ТР
Критерії оцінювання Експертні оцінки Морфологічні таблиці	
А41. Навчання нейронної мережі	
А42. Формування раціонального ТР нейронною мережею	
Згенеровані ТР	

Таблиця 2. Типовий вигляд морфологічної таблиці

Функція підсистеми (елемент), Φ_n	Альтернатива (конструкторсько-технологічне рішення для реалізації Φ_n , A_{nk})	Кількість варіантів реалізації, K_{nk}
Φ_1	$A_{11} A_{12} A_{13} \dots A_{1k_1}$	K_{1k}
Φ_2	$A_{21} A_{22} A_{23} \dots A_{2k_2}$	K_{2k}
...
Φ_n	$A_{n1} A_{n2} A_{n3} \dots A_{nk_n}$	K_{nk}
...
Φ_j	$A_{j1} A_{j2} A_{j3} \dots A_{jk_j}$	K_{jk}

Загальна кількість варіантів реалізації технічного рішення представлена в морфологічній матриці, визначається за формулою (1) [12]:

$$N = \prod_{i=1}^j k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot \dots \cdot k_j \quad (1)$$

де K_n – число альтернатив для реалізації n -ї функції або загальної підсистеми; j – число всіх функцій.

Морфологічна множина є областю пошуку в просторі розмірністю j . Кожен варіант реалізації системи виходить шляхом фіксації по одній альтернативі в кожному рядку морфологічної матриці, який в загальному вигляді записується наступним чином [1]:

$$R_j = \{A_{1f}, A_{2t}, \dots, A_{nm}, \dots, A_{jr}\} \quad (2)$$

де $f = \overline{1, K_1}; t = \overline{1, K_2}; m = \overline{1, K_n}; r = \overline{1, K_j}$.

При формуванні морфологічних таблиць для синтезу раціональних та оптимальних варіантів техніч-

них рішень критерії якості і класифікаційні ознаки повинні бути представлені в такому вигляді, щоб дозволяло проведенню їх кількісної оцінки. Такими основними характеристиками технічних рішень є функції елементів і, власне, конструктивні елементи, які реалізують ті чи інші функції [1].

Кожен синтезований варіант реалізації технічного рішення відрізняється від іншого хоча б однією альтернативою A_{nm} . Для зменшення вибірки альтернатив та їх багатокритеріальної оцінки використовуються математичні комбінаторно-морфологічні методи (A_{31}) та кластерний аналіз (A_{32}).

Алгоритм роботи блоку інтелектуального прийняття рішень (A_4) складається з двох складових: навчання нейронної мережі на основі вхідних даних та експертних оцінок, і безпосередній процес синтезу інженерних рішень відповідно до головної корисної функції (рис.2).

Навчання нейронної мережі (A_{41}) здійснюється на основі фасилітації обміну думками експертами та підрахунку середніх вагових значень. Дана частина алгоритму охоплює дослідження та процес підготовки вхідних даних, безпосередньо, зі сторони науковців.

Як правило, кваліфікація експертної комісії повинна охопити весь технічний об'єкт, тому до її складу входять науковці, дослідники, інженери, конструктори, технологи і т.д. Оцінювання конструктивних рішень здійснюється відповідно до критеріїв, та може проводитися як прямим призначенням вагових коефі-

цієнтів у діапазоні [0..1], так і з використанням інших методів.

Для оцінки множини варіантів конструктивних рішень, а також вагомості окремих властивостей технічного рішення, може бути використана як відкрита групова експертиза зі взаємодією експертів, так і закрита (без їх взаємодії). Кількість необхідних експертів ($N_{екс}$) може бути визначена з урахуванням заданої точності (ϵ) експертної оцінки та її надійності (γ):

$$N_{екс} \geq \frac{t_1^2 \cdot W}{\epsilon}, \quad (3)$$

де t_1 – коефіцієнт, який залежить від γ (значення критерію Стьюдента);

W – коефіцієнт варіації оцінок.

У процесі навчання нейронна мережа здатна уловлювати взаємозв'язки між функціональними одиницями та їх вплив від критеріїв, в результаті чого зможе самостійно генерувати рішення та рекомендувати їх кінцевому користувачу. Як правило, підбір критеріїв здійснюється за функціональними (характеризують найважливіші показники реалізації функцій функціональних вузлів), технічними (пов'язані з можливістю і простотою виготовлення) та економічними (визначають економічну доцільність) особливостями [12].

Під час цього етапу відбувається декомпозиція та реконструкція даних, і подальше навчання нейронної мережі. Типова модель штучного нейрона (рис.3) описується математичним співвідношенням (4) [9].

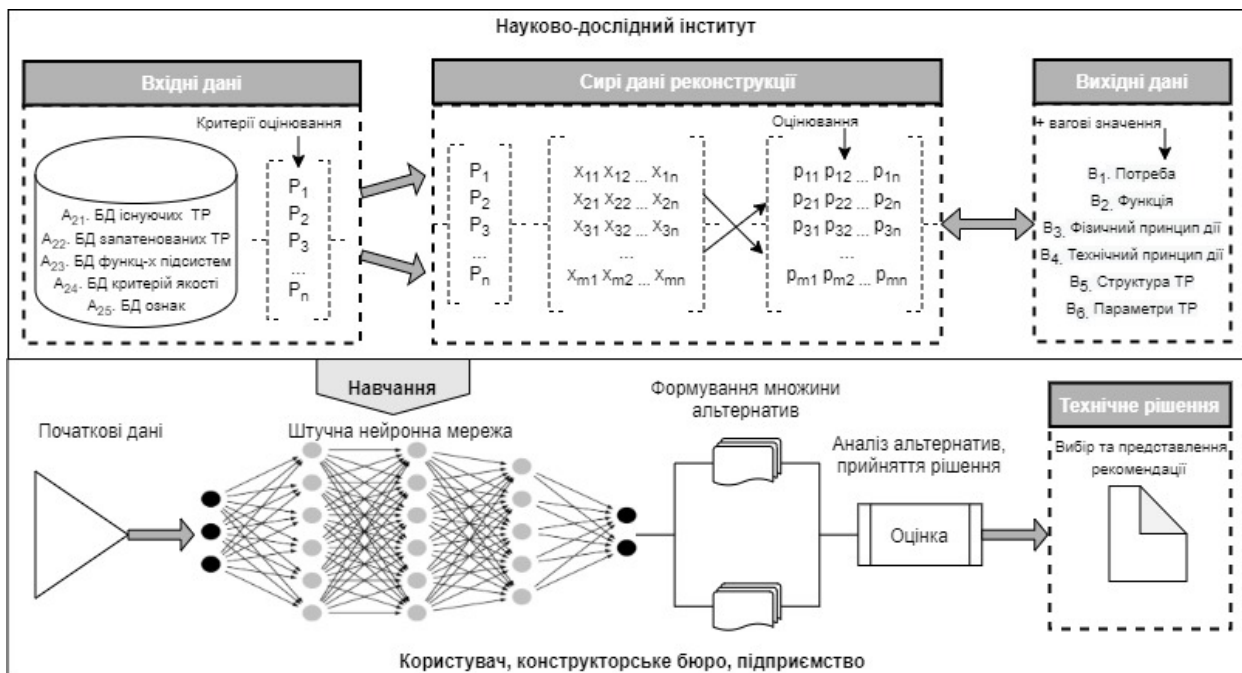


Рис. 2. Алгоритм роботи блоку інтелектуального прийняття рішень

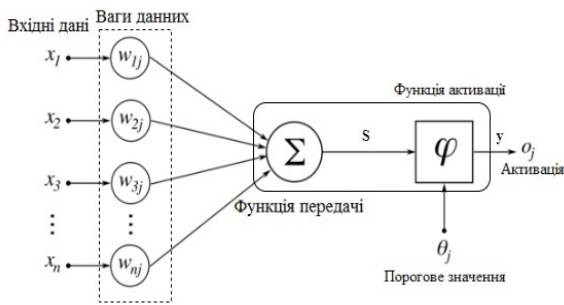


Рис. 3. Модель штучного нейрона [9]

$$\begin{cases} y = f(s) \\ S = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i + \theta \end{cases} \quad (4)$$

де y – вихідний сигнал нейрона, f – нелінійний перетворювач (функція активації), S – результат сумування, ω_i – вага синапса, x_i – компонент вхідного вектора (вхідний сигнал), θ – значення зміщення, n – число входів нейрона.

Формування раціонального ТР нейронною мережею (A₄₂), відповідно до головної корисної функції, відбувається зі сторони кінцевого споживача (конструкторське бюро, підприємство і т.д.). Залежно від поставленого завдання вихідна мета може носити досить загальний характер, якщо завдання вимагає пошуку принципово нового технічного рішення або, якщо проектування пов'язано з вдосконаленням існуючих технічних рішень, то вихідна мета доповнюється і конкретизується рядом техніко-економічних вимог, які можуть бути як якісного, так і кількісного характеру [12]. Даний етап алгоритму забезпечується завдяки навченій нейронній мережі, на попередньому етапі роботи науковців. Це дозволяє користувачу отримувати експертну підтримку прийняття рішення, безпосередньо, на місці, де проходить процес проектування.

Структурно-функціональна модель синтезу інженерних рішень, на основі запропонованого комбінованого підходу, наведена на рис.4.

Декомпозиція даної моделі дозволяє виділити чотири ключових етапи:

1) Постановка задачі – формування початкової мети або постановка проблеми, за допомогою яких відображаються основні вимоги до проєктованого технічного рішення (наприклад, синтез та вибір найкращого варіанта функціональної підсистеми технічного об'єкта).

2) Побудова морфологічної моделі - проведення морфологічного дослідження, при якому здійснюється побудова дерева цілей, формування морфологічної таблиці та заповнення її альтернативами.

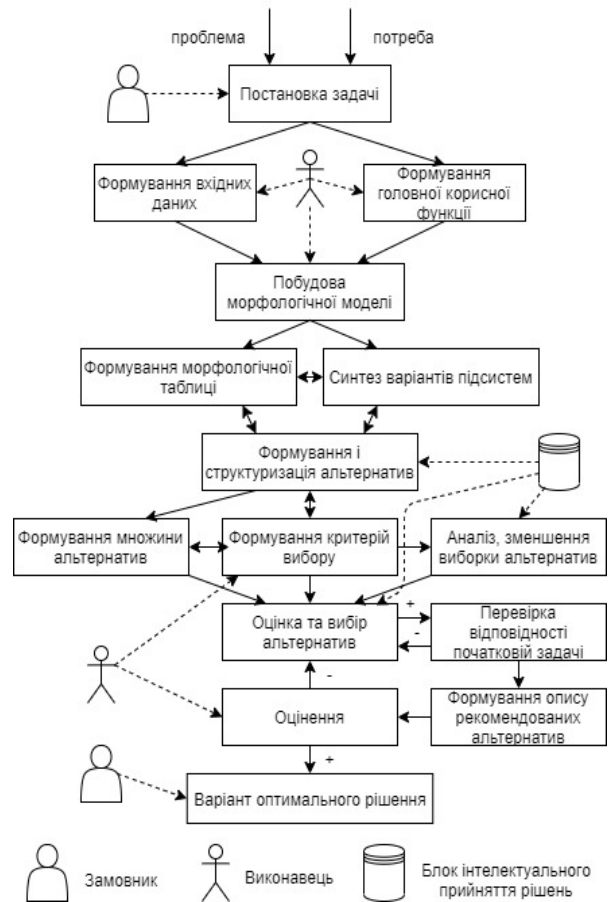


Рис. 4. Структурно-функціональна модель синтезу інженерних рішень

3) Формування і структуризація альтернатив – визначення множини альтернативних варіантів і основних критеріїв для вибору із них найбільш підходящих. На цьому етапі проводиться математична обробка даних з метою зменшення вибірки альтернатив, відсіювання несумісних або менш підходящих варіантів технічного рішення.

4) Рішення задачі – проводиться аналіз та інтерпретація отриманих результатів. Відбувається оцінка та вибір підходящих альтернатив. Оцінка здійснюється відповідно класифікованих функціональних і конструктивних ознак на основі числових значень, які відображають якість альтернатив по вибраним критеріям. Після того здійснюється перевірка на відповідність отриманих рішень початковому завданню, якщо рішення коректне - воно буде рекомендоване користувачу, якщо ні – відбудеться перебір інших варіантів.

Висновки

У даній роботі авторами розглядалась актуальна задача по створенню нових та вдосконаленню існуючих методів пошуку інженерних рішень. Вирішення даної задачі дозволить оптимізувати процес проекту-

вання нових, більш адаптованих і універсальних технічних об'єктів, та пристосувати їх до викликів сьогодення.

Запропонований комбінований підхід до синтезу інженерних рішень, на основі класичного методу морфологічного дослідження та нейромережевої технології, забезпечить процес синтезу інтелектуальною складовою та дозволить розширити технічний рівень розроблених функціональних вузлів, скорочуючи при цьому час їх проектування. Використання нейронних мереж у задачах винахідництва дозволить інженерам скоротити час на опрацювання великої кількості інформації, проведення математичних розрахунків та надасть змогу отримати експертну підтримку прийняття рішення на основі аналізу множини альтернатив з мо-

жливістю адаптуватися до конкретної задачі. Дана технологія належить до суб'єктивних моделей оцінки та прогнозування розроблених рішень, оскільки її робота ґрунтується на основі експертних оцінок, але саме вона дозволяє впровадити в технічне рішення алгоритмічні розрахунки з елементами, притаманних інженеру, складових інтуїції та досвіду, які нерідко стають головними та визначальними у процесі прийняття рішення.

У статті недостатньо було приділено уваги розробці математичної моделі запропонованого алгоритму, але це буде зроблено у наступних працях. Представлені результати роботи використовуватимуться у подальших дослідженнях з метою розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для розв'язання задач синтезу інженерних структур.

References

- [1] A.V. Andrejchikov and O.N. Andrejchikova, *Sistemnyj analiz i sintez strategicheskikh reshenij v innovatike: Matematicheskie, jevristsicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovacij*, Moscow, Russia, 2013.
- [2] V.M. Odrin, *Metod morfologicheskogo analiza tehniceskikh sistem*, Moscow, Russia, 1989.
- [3] N.D. Pankratova and I.O. Savchenko, "Zastosuvannia metodu morfologichnoho analizu do zadach tekhnolohichnoho peredbachennia", *Naukovi pratsi. Ser.: Kompiuterni tekhnolohii*, 90, no. 77, pp. 6–13, 2008.
- [4] Y. Kuznetsov and F. El-Dahabi, "Realizatsiia tanhentsialnoho zatysku v instrumentalno-tekhnolohichnomu osnashchenni iz zastosuvanniam tsanhovykh patroniv", *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 2(89), 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211037>
- [5] O. Uzunov, "Systemne uiavlennia obiekta v konteksti vyrishennia praktychnykh zavdan", *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 1(79), pp. 64–70, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.96910>
- [6] S. Miladinović, S. Veličković and M. Novaković, "Application of Taguchi method for the selection of optimal parameters of planetary driving gear", *Applied Engineering Letters*, Vol. 1, No 4, pp. 98–104, 2016. <https://www.aeletters.com/wp-content/uploads/2017/02/AEL00017.pdf>
- [7] Y. Danylchenko and M. Storchak, "Rozrobka pryntsyviv proektuvannia tekhnolohichnykh system dlia oporiadzhuvalnoi obrobky zubchastykh koles", *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 1(85), pp. 26–34, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.154822>
- [8] D.F. Thompson, S. Gupta and A. Shukla, "Tradeoff analysis in minimum volume design of multi-stage spur gear reduction units", *Mechanism and Machine Theory*, pp. 609–627, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(99\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00036-1)
- [9] O.V. Litvin, I.R. Yashchuk and S.B. Pankov, "Analiz peredumov zastosuvannia neuronnykh merezh pry syntezi konstruktivnoy mashynobudovanni", *Naukovi notatky*, Vol. 64, pp. 92–98, 2018.
- [10] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*, Ontario Canada, 2009.
- [11] O. Litvin, I. Yashchuk and S. Pankov, "Prerequisites for the use of neural networks in the synthesis of structures in mechanical engineering", *Prohresyva tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita*, pp. 124–128, 2020.
- [12] I.R. Yashchuk and S.B. Pankov, "Optimizacija processa sinteza novykh tehniceskikh reshenij v mashinostroenii", in *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroenija, jenergetiki i upravlenija*, XIX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh, Gomel', Apr. 25–26, 2019, pp. 65–68.

Алгоритмизация комбинированного подхода к синтезу инженерных решений

А. В. Литвин, С. Б. Паньков, И. Р. Ящук

Аннотация. В данной статье уделено внимание решению проблемы проектирования новых, более адаптированных и универсальных технических объектов, связанных с концептуальным проектированием сложных конструктивных элементов, и требуют анализа и оценки большого количества возможных альтернатив. Для решения данной проблемы возникает актуальная задача создания новых и совершенствования существующих методов поиска инженерных решений, которые позволят эффективно решать задачу синтеза технических решений с применением современных технологий. Решение поставленной задачи представлено в данной статье, в которой предложен комбинированный подход к синтезу инженерных решений, на

основе классического метода морфологического исследования (для формирования множества альтернатив) и нейросетевой технологии (для формирования рационального технического решения). В статье представлен разработанный алгоритм работы блока интеллектуального принятия решений, который обеспечивает процесс синтеза инженерных решений интеллектуальной составляющей и расширяет технический уровень разработанных функциональных узлов, сокращая при этом время их проектирования. В работе представлена разработанная структурно-функциональная модель синтеза инженерных решений, на основе предложенного комбинированного подхода.

Ключевые слова: синтез; техническое решение; проектирование; изобретательство; машиностроение; оптимизация; нейронная сеть.

Algorithmization of the combined approach to the synthesis of engineering solutions

O. Litvin, S. Pankov, I. Yashchuk

Abstract. This article focuses on solving the problem of designing new, more adapted and universal technical objects associated with the conceptual design of complex structural elements, and require the analysis and assessment of a large number of possible alternatives. To solve this problem, an urgent problem arises of creating new and improving existing methods for finding engineering solutions that will effectively solve the problem of synthesizing technical solutions using modern technologies. The solution to this problem is presented in this article, which proposes a combined approach to the synthesis of engineering solutions, based on the classical method of morphological research (to form a set of alternatives) and neural network technology (to form a rational technical solution). The article presents the developed algorithm for the operation of the block of intelligent decision making, which provides the process of synthesizing engineering solutions of the intellectual component and expands the technical level of the developed functional units, while reducing their design time. The paper presents a developed structural-functional model for the synthesis of engineering solutions, based on the proposed combined approach.

Keywords: synthesis; technical solution; designing; invention; mechanical engineering; optimization; neural network.