

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, Р. В. ПРОТАСОВ, І. Є. КЛОЧКОВ, С. В. АНДРІЄНКО

УЗАГАЛЬНЕНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ ТРАНСМІСІЙ ВІЙСЬКОВИХ КОЛІСНИХ МАШИН ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ

Для якісного формулювання завдання раціонального проєктування комплексу елементів механічної ступінчастої трансмісії колісної бронемашини, а також для безпомилкового формування атрибутів задачі, необхідно здійснити перехід від реального об'єкта до його структурної схеми. Такий перехід зручно робити через кінематичну схему об'єкта та структурну схему трансмісії до структурно-логічної схеми. Описано актуальність науково-практичної задачі розробки методу узагальненої декомпозиції трансмісій військових колісних машин для визначення ймовірності безвідмовної роботи. Це дає змогу зрозуміти необхідність висвітлення вказаної теми та проведення відповідних досліджень та наукових викладок стосовно питання. Описано основні категорії, введено поняття «логічний елемент», сформовано ланцюг ієрархічних відносин між основними категоріями. Це дає змогу максимально спростити та формалізувати підхід до побудови моделі раціонального проєктування трансмісій військових колісних машин, бо категорії «логічний елемент» та «механізм» пов'язані з цільовими функціями (критеріями) та обмеженнями, а категорія «деталь» пов'язана з параметрами проєктування та обмеженнями. Сформовано лаконізований перелік структурно-логічних елементів, який дає змогу при декомпозиції замінити як самостійно прості, так і сукупно від розділення складних, конструктивні агрегати. Надано приклад проведення декомпозиції {схем} трансмісій військових колісних машин, що дає змогу наочно продемонструвати запропонований підхід. Для типових конструктивних схем структурно-логічних елементів надано структурно-логічні схеми. Це дає змогу, спираючись на положення теорії надійності технічних систем, сформувати залежності вірогідностей безвідмовної роботи кожного структурно-логічного елемента з подальшою композицією у цільову функцію вірогідності безвідмовної роботи трансмісійної системи.

Ключові слова: ступінчаста трансмісія, декомпозиції, вірогідності безвідмовної роботи, цільова функція.

O. BONDARENKO, O. USTYENKO, R. PROTASOV, I. KLOCHKOV, S. ANDRIENKO

GENERALIZED DECOMPOSITION OF TRANSMISSIONS OF MILITARY WHEEL VEHICLES TO DETERMINE THE PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION

For a qualitative formulation of the task of rational design of a set of elements of a mechanical step transmission of a wheeled armored vehicle, as well as for the error-free formation of the attributes of the task, it is necessary to make a transition from a real object to its structural diagram. Such a transition is conveniently made through the kinematic diagram of the object and the structural diagram of the transmission to the structural-logical diagram. The relevance of the scientific and practical task of developing an approach to generalized decomposition of transmissions of military wheeled vehicles to determine the probability of failure-free operation is described. This makes it possible to understand the need to cover the specified topic and conduct relevant research and scientific calculations on the issue. The main categories are described, the concept of "logical element" is introduced, and a chain of hierarchical relationships between the main categories is formed. This allows us to maximally simplify and formalize the approach to building a model of rational design of transmissions of military wheeled vehicles, because the categories "logical element" and "mechanism" are related to target functions (criteria) and constraints, and the category "detail" is related to design parameters and constraints. A concise list of structural-logical elements has been formed, which allows us to replace both simple ones independently during decomposition and complex ones collectively when separating them. An example of the decomposition of transmissions of military wheeled vehicles is provided, which allows us to clearly demonstrate the proposed approach. Structural-logical diagrams are provided for typical structural-logical element designs. This allows us to form, based on the provisions of the theory of reliability of technical systems, the dependences of the probability of failure-free operation of each structural-logical element with subsequent composition into the target function of the probability of failure-free operation of the transmission system.

Keywords: step transmission, decompositions, probabilities of failure-free operation, objective function.

Вступ. Актуальність задачі. Для якісного формулювання завдання раціонального проєктування комплексу елементів механічної ступінчастої трансмісії колісної бронемашини, а також для безпомилкового формування комплексу атрибутів (параметрів проєктування, цільових функцій, системи обмежень, тощо) задачі, необхідно здійснити перехід від реального об'єкта до його структурної схеми. Такий перехід зручно робити через кінематичну схему об'єкта.

Під кінематичною схемою [1, 2] зазвичай мають на увазі умовне зображення механізму в певному масштабі, зі збереженням пропорцій довжин всіх ланок, координат нерухомих точок тощо, тобто так звану метрику механізму. Ланки на кінематичній схемі зображуються максимально спрощено, тобто тільки ті елементи, які впливають на характер та передачу руху.

Кінематична схема трансмісійних приводів, як правило, складається на основі реального або перспективного об'єкта та відображає спрощену розрахункову схему передачі. Така схема може виконуватися у комбінованому вигляді як поєднання класичної кінематичної схеми та блок-схеми, на якій умовно, у вигляді прямокутників, позначаються елементи передачі, що виконують задані функції, а також кі-

нематичні зв'язки між ними.

Але кінематична схема інколи є надлишковою для формулювання постановки задачі раціонального проєктування трансмісії, не дає повного розуміння структури останньої, а також обмежує коло пошуку оптимально-раціональних розв'язків. Тому зручно здійснити перехід до структурної схеми. В узагальненому розумінні під структурною схемою маєтись на увазі графічне зображення, яке визначає основні функціональні частини об'єкта (елемент, пристрій, функціональна група, функціональна ланка), їх взаємозв'язки та призначення.

Структурна схема трансмісії – це графічне зображення, яке відображає всі складові та з'єднання системи передачі потужності в автомобілі. Вона включає в себе всі елементи, такі як коробка передач, зчеплення, роздавальна коробка, диференціал та інші компоненти, а також показує порядок їх взаємодії та способи передачі крутного моменту від двигуна до коліс або іншого кінцевого вузла. Така схема допомагає розуміти принцип роботи всієї системи, дає змогу для структурного аналізу, може бути використана для подальших розрахунків, побудови

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, Р. В. Протасов,
І. Є. Клочков, С. В. Андрієнко, 2025

моделей, графічних операцій.

Саме структурні схеми трансмісії у сьогоденні активно використовуються для наочної візуалізації їх роботи та зв'язків складових елементів [3–5].

Тому розробка методу узагальненої декомпозиції трансмісій військових колісних машин для визначення насамперед ймовірності безвідмовної роботи є актуальною науково-практичною задачею.

Основна частина. Для формування постановки завдання раціонального проектування комплексу елементів механічних ступінчастих трансмісій колісних військових машин загальноприйнятої компоновальної структурної схеми може бути недостатньо. Це викликано значно вищим рівнем складності як всієї системи, так і окремих її елементів. Більш того, вузли вказаного типу машин часто поєднані в складні агрегати, що також ускладнює формування елементів завдання. Саме тому пропонується перейти до структурно-логічної схеми.

Під структурно-логічною схемою будемо мати на увазі графічне зображення трансмісії військової машини, яке відображає всі логічні складові елементи та з'єднання між ними, та показує послідовний, можливо, розгалужений ланцюг передавання крутного моменту від двигуна до привідних коліс.

Дамо пояснення категорії «логічний елемент». Це зручно робити в порівнянні з категорією «конструктивний елемент».

Конструктивний елемент [6] – фізично самостійна частина системи трансмісії, що є конструктивно завершеним технічним елементом або сукупністю технічних елементів, та виконаний з урахуванням заданих умов експлуатації, технічного обслуговування, енергетичного живлення та просторового розміщення. Таким чином, категорія «конструктивний елемент» максимально наближена до категорії «агрегат» – сукупність двох і більше конструктивно об'єднаних різнотипних машин, що діють спільно.

Логічний елемент – частина системи трансмісії, що може бути лише конструктивно завершеним технічним елементом, який виконує покладені на себе функції перетворення заданого руху однієї (або декількох деталей) на необхідний рух іншої деталі (або деталей) і не може бути далі розділений на послідовно залежні між собою технічні елементи. Тобто, «логічний елемент» є категорією нижчого рангу в порівнянні з категорією «конструктивний елемент».

Ланцюг ієрархічних відносин в такій градації буде виглядати наступним чином: система → конструктивний елемент → логічний елемент → механізм → деталь. Саме розбиття та розуміння структури трансмісії до рівня логічних елементів дає змогу легко вирішити проблему та сформулювати модель раціонального проектування, бо, зазвичай, категорії «логічний елемент» та «механізм» пов'язані з цільовими функціями (критеріями) та обмеженнями, а категорія «деталь» пов'язана з параметрами проектування та обмеженнями (рис. 1).

Таким чином, для зручного формування моделі раціонального проектування трансмісії військової машини дуже важливо провести декомпозицію до рівня логічних елементів. Тобто, будь яка трансмісія, що розглядається, може бути представлена у

вигляді декомпозиційної структурно-логічної схеми. Узагальнена декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії військової машини надана на рис. 2. На ньому відображені загально-розповсюджені конструктивні агрегати та прийняті відповідні позначення: Дв – двигун; КП – коробка передач; ПР – підсумовуючий ряд; РК – роздавальна коробка; ДоР – додатковий редуктор; МО – міжосьовий диференціал; МК – міжколійний диференціал; ДЕ – будь який додатковий елемент трансмісії поза цим переліком; КО – колісний редуктор; К – колесо.

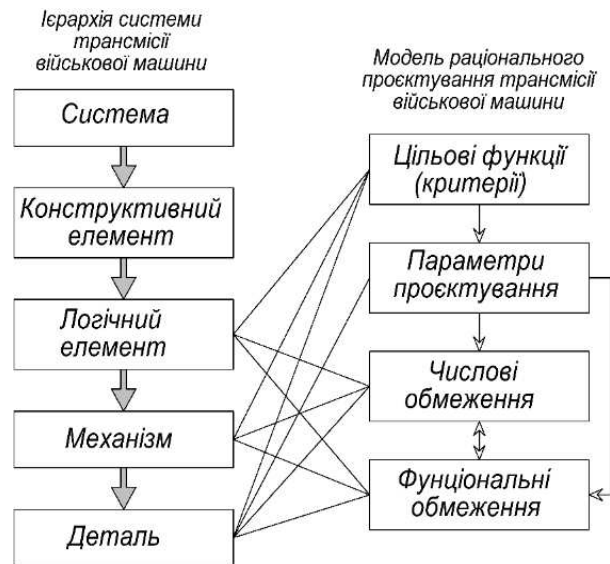


Рисунок 1 – Ієрархія та модель раціонального проектування трансмісії військової машини, а також внутрішні та зовнішні зв'язки

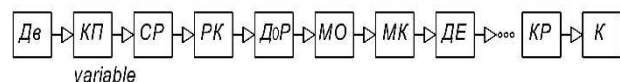


Рисунок 2 – Узагальнена декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії військової машини

Звісно, реальний об'єкт буде мати свою унікальну структурно-логічну схему з переліком і послідовністю логічних елементів, що відповідає його конструктивній схемі.

Аналізуючи значну кількість об'єктів дослідження [7–10], можна зробити висновок, що деякі конструктивні агрегати трансмісій, які традиційно використовують у ролі структурно-логічних одиниць, можуть бути представлені сукупністю більш простих структурно-логічних елементів. Прикладами можуть виступити: багатовальні коробки передач, які для деяких конструктивних схем можуть бути розділені на два чи більше окремих елементів – редуктор та двохвальна коробка передач, чи сукупність двох двохвальних коробок передач, тощо; роздавальні коробки – сукупністю редукторів, чи редуктора та коробки передач; міжколійний диференціал – редуктора та зубчастого диференціала, тощо.

У зв'язку з цим пропонується окреслити мінімально можливий перелік максимально простих структурно-логічних елементів, які можуть замінити як самостійно прості, так і сукупно від розділення складних, конструктивні агрегати.

Пропонується обмежитись наступним переліком структурно-логічних елементів:

- коробка передач, двохвальна або трьохвальна (КП),
- редуктор (Р),
- підсумовуючий редуктор (ПР),
- планетарний ряд (ПлР),
- зубчастий диференціал (ЗД).

Як було зазначено вище, структурно-логічні елементи КП та ПР мають можливість бути представленими у вигляді сукупності редукторів, що з'єднані паралельно чи за змішаною схемою. Але конструктивна взаємопов'язаність та, відповідно, і функціональні зв'язки схиляють залишити вказані структурно-логічні елементи неподільними.

Зважаючи на вказані вище пропозиції узагальнена лаконізована декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії військової машини прийме наступний вигляд – рис. 3.

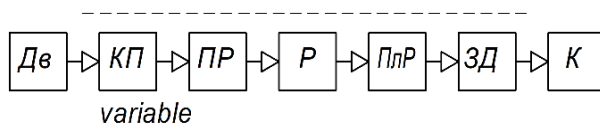


Рисунок 3 – Узагальнена лаконізована декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії військової машини

Такий підхід дає змогу формалізувати концепцію декомпозиції, окреслити типові структурно-логічні елементи та зменшити їх загальну кількість.

Спираючись на таку формалізовану структурно-логічну схему зручно формулювати атрибути моделі раціонального проектування трансмісії військової машини. Звертаючись до кожного окремого логічного елемента проектувальник формулює для нього одну чи декілька цільових функцій за бажаними критеріями якості, які можуть бути як самостійними, що не залежать від решти системи, так і одним з доданків цільової функції, яка характеризує всю систему. Відповідно, в моделі можуть бути присутні цільові функції, що характеризують критерії якості як окремого логічного елемента, так і всієї системи трансмісії військової машини.

У безпосередньому зв'язку з цільовими функціями системи знаходиться перелік параметрів проектування, який складається із сукупності цих параметрів для окремих логічних елементів системи.

Такий самий підхід використовується і по відношенню до системи обмежень. Розглядаючи окремо кожен логічний елемент, проектувальник формулює для нього ряд числових та функціональних обмежень. Такі ряди для кожного окремого логічного елемента у сукупності формують одну з складових моделі раціонального проектування трансмісії військової машини – пул обмежень всієї системи.

Структурно-логічна декомпозиція дає змогу максимально глибоко «розгорнути» систему для елементного аналізу та формування підскладових моделі раціонального проектування. Подальша композиція трансмісійної системи на рівні підскладових елементів моделі дає змогу отримати закінчену модель раціонального проектування трансмісії військової машини.

Далі наведено приклад декомпозиції трансмісії

військової машини (рис. 4) та побудови структурно-логічної схеми.

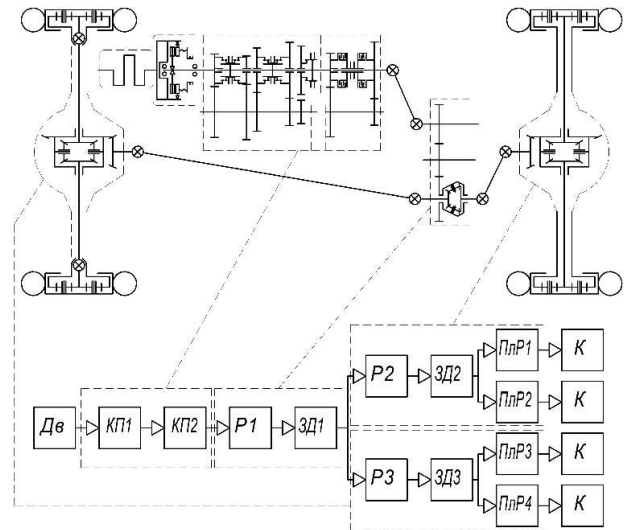


Рисунок 4 – Кінематична схема трансмісії та узагальнена лаконізована декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії військової машини

Надана трансмісія складається з двигуна, зчеплення, коробки передач, роздатної коробки, переднього та заднього мостів. Використаємо лаконізований перелік структурно-логічних елементів для опису та побудови декомпозиційної схеми. Коробка передач є складною і структурно поєднує дві послідовно з'єднані прості трихвальні коробки передач (КП1, КП2). Роздавальна коробка є поєднанням редуктора (Р1) та міжмостового зубчастого диференціала (ЗД1). Кожен з мостів складаються з конічного редуктора (Р2 (Р3)), зубчастого диференціала (міжвісьового) (ЗД2 (ЗД3)) та планетарних рядів колісних редукторів (ПлР1, ПлР2 (ПлР3, ПлР4)). Відповідно до кінематичної схеми, потоків потужності та описаних логічних елементів, узагальнена лаконізована декомпозиційна структурно-логічна схема трансмісії вибудовується у вигляді розвиненої симетричної деревоподібної структури з двома ярусами дихотомного гілкування.

Метою даної роботи є формування цільової функції вірогідності безвідмовної роботи всієї трансмісійної системи.

У відповідності до теорії надійності технічних систем для послідовно з'єднаних n елементів вірогідність безвідмовної роботи системи буде дорівнювати добутку вірогідностей безвідмовної роботи всіх елементів:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (1)$$

Для паралельно з'єднаних m елементів:

$$p = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_j]. \quad (2)$$

Для наданого прикладу у відповідності до узагальненої лаконізованої декомпозиційної структурно-логічної схеми цільова функція приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 P &= P_{KП1} \cdot P_{KП2} \cdot P_{P1} \cdot P_{ЗД1} \cdot P_M; \\
 P_M &= 1 - (1 - P_{M1}) \cdot (1 - P_{M2}); \\
 P_{M1} &= P_{P2} \cdot P_{ЗД2} \cdot [1 - (1 - P_{ПлP1}) \cdot (1 - P_{ПлP2})]; \\
 P_{M2} &= P_{P3} \cdot P_{ЗД3} \cdot [1 - (1 - P_{ПлP3}) \cdot (1 - P_{ПлP4})].
 \end{aligned} \quad (3)$$

Далі розглянемо визначення вірогідностей безвідмовної роботи запропонованого лаконізованого переліку структурно-логічних елементів.

У якості субелементів лаконізованої декомпозиційної структурно-логічної схеми трансмісії військової машини використаємо зубчасті передачі. Кожен субелемент характеризується трьома ймовірностями безвідмовної роботи ($p(K_{nH})$; $p(K_{nF1})$; $p(K_{nF2})$), що відповідають розрахунковим коефіцієнтам рівня напруженості за контактом та згином, які пов'язані логічним «І».

Коефіцієнти рівня напруженості, відповідно за контактом та згином:

$$K_{nH} = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma_H}; K_{nF1} = \frac{\sigma_{FP1}}{\sigma_{F2}}; K_{nF2} = \frac{\sigma_{FP2}}{\sigma_{F2}}. \quad (4)$$

У формулі (4): $\sigma_H, \sigma_{HP}, \sigma_{F1}, \sigma_{FP1}, \sigma_{F2}, \sigma_{FP2}$ – діючі та допустимі (P) напруження контакту (H) і згину (F).

Таким чином цільова функція вірогідності безвідмовної роботи трансмісійної системи відображає «інтегральну» величину, яка містить в собі всі розрахункові коефіцієнти рівня напруженості за згинними та контактними напруженнями.

У двовальній коробці передач потік потужності від первинного до паралельного вторинного валу завжди передається тільки через одну пару зубчастих коліс. Тому таку коробку передач називають ще однопарною. Її принципова схема зображена на рис. 5.

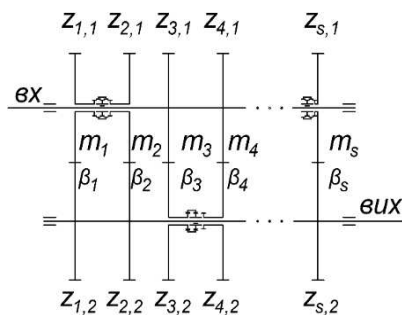


Рисунок 5 – Принципова схема двовальної КП

Для двовальної КП кількість розрахункових коефіцієнтів рівня напруженості буде дорівнювати $3s$.

Структурно-логічна схема зубчастих зачеплень двовальної КП наведена на рисунку 6.

Виходячи з залежностей для ймовірностей у випадках паралельного та послідовного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи P всієї системи буде дорівнювати:

$$P_{ДвКП} = 1 - \prod_{j=1}^s [1 - p(K_{nHj}) \cdot p(K_{nFj1}) \cdot p(K_{nFj2})]. \quad (5)$$

Таким чином, у проєктувальника з'являється

можливість пов'язати набір параметрів проєктування зубчастих зачеплень КП з вірогідністю безвідмовної роботи даного структурно-логічного елемента.

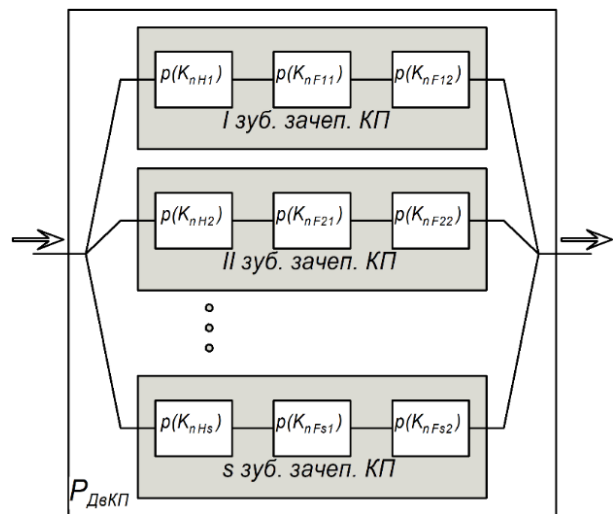


Рисунок 6 – Структурно-логічна схема зубчастих зачеплень двовальної КП

Трьохвальні коробки передач. Відповідно до схеми (рис. 7), осі вхідного та вихідного валів співпадають. Вмикання певної передачі здійснюється відповідним з'єднанням зубчастих коліс з вихідним валом за допомогою зубчастої муфти, синхронізатора або рухомих шестерень, зубчасті колеса проміжного вала з'єднані з останнім жорстко. На проміжний вал обертальний момент передається через зубчасту пару постійного зачеплення. На кожній не прямій передачі трьохвальна коробка передач працює як двоступінчастий зубчастий співвісний редуктор.

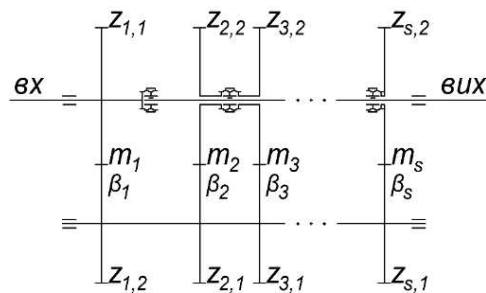


Рисунок 7 – Схема трьохвальної коробки передач

Вірогідності у межах субелементу, пов'язані логічним «І», а самі субелементи з'єднані за змішаною схемою. Постійне (перше) зубчасте зачеплення з'єднане послідовно з блоком інших зачеплень, які в свою чергу з'єднані паралельно між собою. Структурно-логічна схема зубчастих зачеплень трьохвальної коробки передач наведена на рис. 8.

Виходячи з залежностей ймовірностей для паралельного та послідовного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи (P) всієї системи буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
 P_{ДвКП} &= [p(K_{nH1}) \cdot p(K_{nF11}) \cdot p(K_{nF12})] \times \\
 &\times \left[1 - \prod_{j=2}^s [1 - p(K_{nHj}) \cdot p(K_{nFj1}) \cdot p(K_{nFj2})] \right].
 \end{aligned} \quad (6)$$

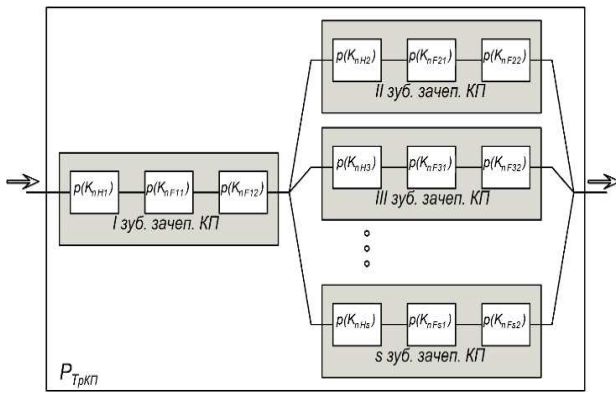


Рисунок 8 – Структурно-логічна схема зубчастих зацеплень тривальної коробки передач

Таким чином, у проєктувальника з'являється можливість пов'язати набір параметрів проєктування зубчастих зацеплень тривальної коробки передач з вірогідністю безвідмовної роботи.

Редуктори. Частіше застосовуються одноступінчасті та двохступінчасті редуктори, які можуть бути виконані як у розгорнутій, так і у співвісній компоновках.

Складністю проєктування двохступінчастих редукторів є розподілення передавальних чисел між ступенями редуктора та, як наслідок, обрання відповідних конструктивних параметрів.

Розглянемо кінематичну схему двохступінчастого редуктора (рис. 9).

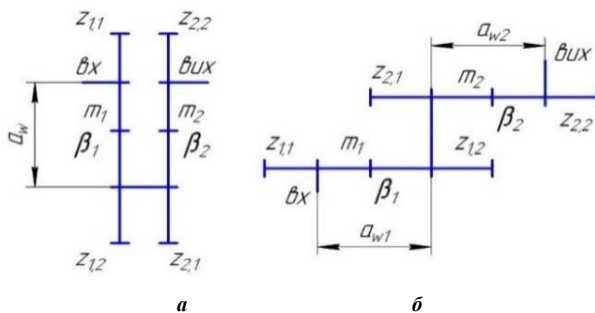


Рисунок 9 – Схема двохступінчастого редуктору: а – співвісна схема; б – розгорнута схема

Вірогідності у межах субелементу та самі субелементи пов'язані логічним "І".

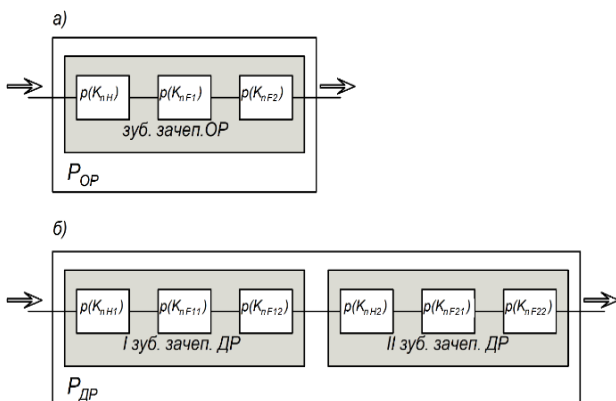


Рисунок 10 – Структурно-логічні схеми зубчастих передач одноступінчастого (а) та двохступінчастого (б) редукторів

Структурно-логічні схеми зубчастих передач

одноступінчастого (ОР) (а) та двохступінчастого (ДР) (б) редукторів наведені на рис. 10.

Виходячи з теореми множення ймовірностей для послідовного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи (P) всієї системи буде дорівнювати:

- для одноступінчастого редуктора:

$$P_{OP} = p(K_{nH}) \cdot p(K_{nF1}) \cdot p(K_{nF2}). \quad (7)$$

- для двохступінчастого редуктора:

$$P_{ДР} = p(K_{nH1}) \cdot p(K_{nF11}) \cdot p(K_{nF12}) \times p(K_{nH2}) \cdot p(K_{nF21}) \cdot p(K_{nF22}). \quad (8)$$

Підсумовуючий редуктор призначений для підсумовування та передачі потужності від двох паралельно розташованих силових агрегатів до приводу ступінчастих трансмісії колісних військових машин.

Розглянемо типові кінематичні схеми підсумовуючих редукторів (рис. 11).

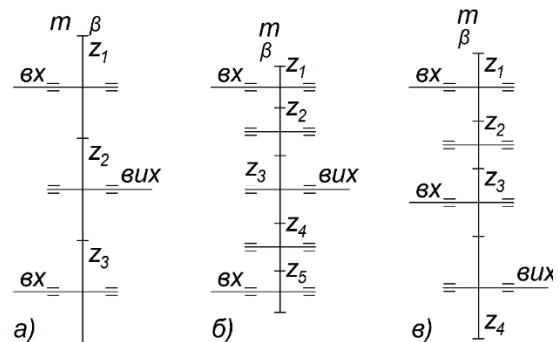


Рисунок 11 – Типові кінематичні схеми симетричних (а, б) та асиметричного (в) підсумовуючих редукторів

Вірогідності у межах субелементу, пов'язані логічним "І", а самі субелементи можуть бути пов'язані за замішаною схемою.

Структурно-логічні схеми зубчастих передач симетричних (а, б) та асиметричного (в) підсумовуючих редукторів наведені на рисунку 12.

Виходячи з положень для послідовного та паралельного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи (P) всієї системи буде дорівнювати:

- симетричного (а) підсумовуючого редуктора:

$$P_{ПР} = 1 - [1 - p(K_{nH1-2}) \cdot p(K_{nF1}) \cdot p(K_{nF2})] \times [1 - p(K_{nH3-2}) \cdot p(K_{nF3}) \cdot p(K_{nF2})]. \quad (9)$$

- симетричного (б) підсумовуючого редуктора:

$$P_{ПР} = 1 - [1 - p(K_{nH1-2}) \cdot p(K_{nF1}) \cdot p(K_{nF2}) \times p(K_{nH3-2}) \cdot p(K_{nF3}) \cdot p(K_{nF2})] \times [1 - p(K_{nH5-4}) \cdot p(K_{nF5}) \cdot p(K_{nF4}) \times p(K_{nH3-2}) \cdot p(K_{nF3}) \cdot p(K_{nF2})]. \quad (10)$$

- асиметричного (в) підсумовуючого редуктора:

$$P_{ПР} = p(K_{nH1-2}) \cdot p(K_{nF1}) \cdot p(K_{nF2}) \times p(K_{nH3-2}) \cdot p(K_{nF3}) \cdot p(K_{nF2}) \times p(K_{nH3-4}) \cdot p(K_{nF3}) \cdot p(K_{nF4}). \quad (11)$$

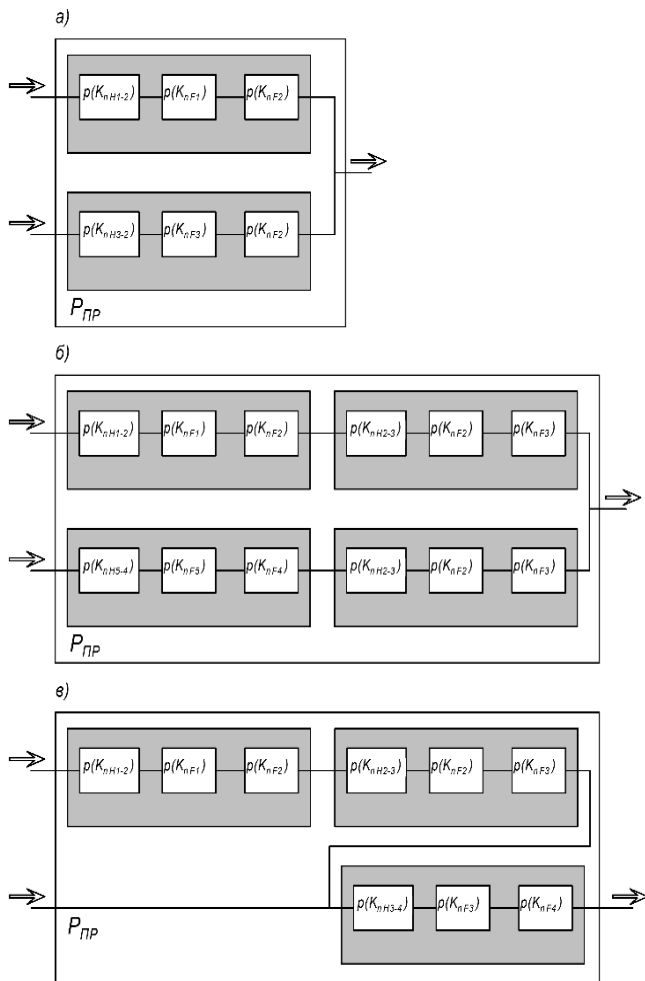


Рисунок 12 – Структурно-логічні схеми зубчастих передач симетричних (а, б) та асиметричного (в) підсумовуючих редукторів

Планетарний ряд. Планетарними [11] називають такі зубчасті механізми, у яких осі деяких коліс змінюють своє положення у просторі.

Розглянемо типові кінематичні схеми планетарних рядів (рис. 13).

На рисунку 13 прийняті наступні позначення: m – модуль ряду зубчастих коліс; z_c – число зубців сонячного колеса; z_e – число зубців епіцикла; z_{cm} – число зубців сателітів.

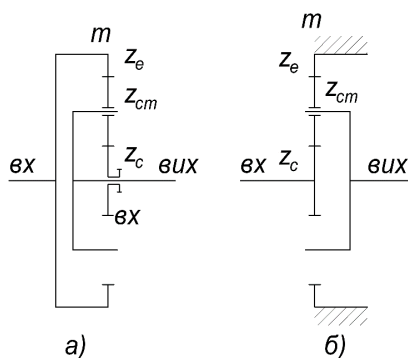


Рисунок 13 – Типові кінематичні схеми планетарних рядів при використанні у вигляді підсумовуючого (а) та звичайного (б) редукторів

Вірогідності у межах субелементу, пов'язані

логічним "І", а самі субелементи пов'язані за паралельною схемою.

Структурно-логічна схема планетарних рядів при використанні у вигляді підсумовуючого та звичайного редукторів є ідентичними та наведена на рис. 14.

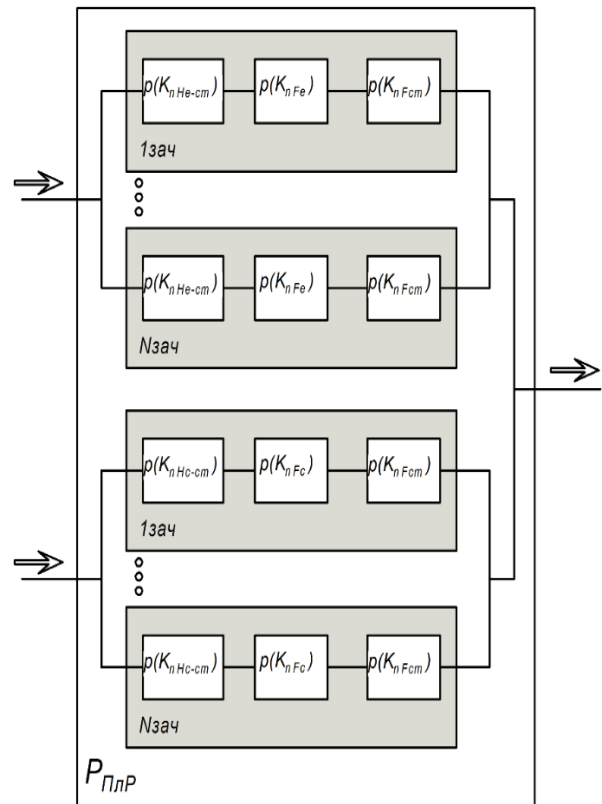


Рисунок 14 – Структурно-логічні схеми планетарних рядів при використанні у вигляді підсумовуючого та звичайного редукторів:

$p(K_{nH})$, $p(K_{nF})$ – вірогідності безвідмовної роботи передач за контактом та згином; c – сонячне зубчасте колесо, cm – сателіти, e – епіцикл.

Виходячи з положень для послідовного та паралельного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи (P) всієї системи буде дорівнювати:

$$P_{ПР} = 1 - \left[\prod_{i=1}^N [1 - p(K_{nHe-cm}) \cdot p(K_{nFe}) \cdot p(K_{nFcm})] \right] \times \left[\prod_{i=1}^N [1 - p(K_{nHc-cm}) \cdot p(K_{nFc}) \cdot p(K_{nFcm})] \right] \quad (12)$$

Зубчасті диференціали. Диференціал – механічна зубчато-важільна (планетарна) складова трансмісії, що передає обертання з одного ведучого елемента на два незалежних ведених вали і дає змогу їм обертатися з різними кутовими швидкостями.

Механічні диференціали охоплюють дуже різноманітний конструктивний ряд. Актуальними для даної роботи є саме зубчасті диференціали, тому далі розглянемо у якості прикладу декілька найбільш розповсюджених типових схем – а саме, зубчастих кінцевого симетричного та циліндричного несиметричного (рис. 15).

На рисунку 15 прийняті наступні позначення: m – модуль ряду зубчастих коліс; Z_c – число зубців сонячного колеса; Z_e – число зубців епіциклу; – число зубців сателітів.

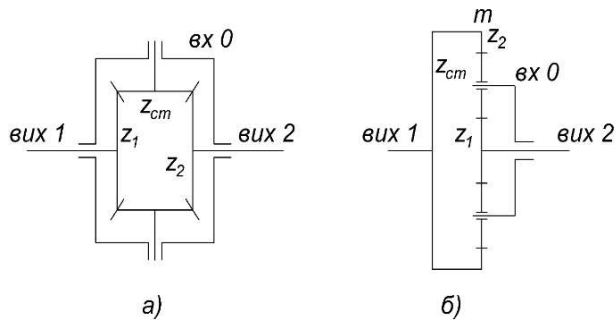


Рисунок 15 – Типові кінематичні схеми зубчастих конічного симетричного та циліндричного несиметричного диференціалів

Вірогідності у межах субелементу, пов'язані послідовно, а самі субелементи пов'язані за паралельною схемою.

Структурно-логічні схеми для наданих схем зубчастих диференціалів є ідентичними та наведені на рис. 16.

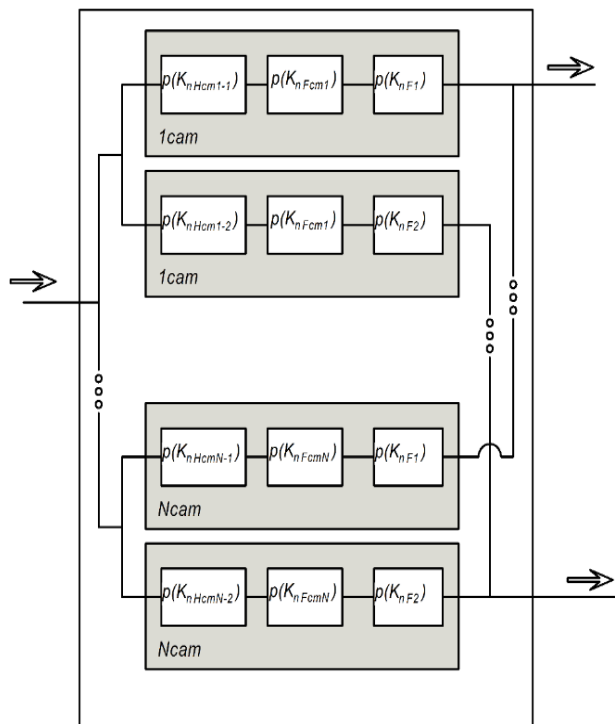


Рисунок 16 – Структурно-логічні схеми зубчастих конічного симетричного та циліндричного несиметричного диференціалів

Виходячи з положень для послідовного та паралельного з'єднання субелементів, вірогідність безвідмовної роботи (P) всієї системи буде дорівнювати:

$$P_{зд} = 1 - \left[\prod_{i=1}^N [1 - p(K_{nHcmN-1}) \cdot p(K_{nFcmN}) \cdot p(K_{nF1})] \right] \times \left[\prod_{i=1}^N [1 - p(K_{nHcmN-2}) \cdot p(K_{nFcmN}) \cdot p(K_{nF2})] \right] \quad (13)$$

Таким чином, надані залежності (1, 2, 5–13) дають змогу проєктувальнику здійснити композицію цільової функції вірогідності безвідмовної роботи трансмісійної системи, яка містить в собі всі розрахункові коефіцієнти рівня напруженості за згинними та контактними напруженнями. Також зазначимо, що, за необхідності, в композицію цільової функції можуть бути легко введені будь які додаткові компоненти вірогідностей безвідмовної роботи, не пов'язані з зубчастими передачами $p(V)$:

$$P = F(p(K_{nH}), p(K_{nF}), p(V)). \quad (14)$$

Висновки:

1. Доведено актуальність науково-практичної задачі розробки підходу узагальненої декомпозиції трансмісій військових колісних машин для визначення ймовірності безвідмовної роботи. Це дає змогу зрозуміти необхідність висвітлення вказаної теми та проведення відповідних досліджень та наукових викладок стосовно питання.

2. Описано основні категорії, введено поняття «логічний елемент», сформовано ланцюг ієрархічних відносин між основними категоріями. Це дає змогу максимально спростити та формалізувати підхід до побудови моделі раціонального проєктування трансмісій військових колісних машин, бо категорії «логічний елемент» та «механізм» пов'язані з цільовими функціями (критеріями) та обмеженнями, а категорія «деталь» пов'язана з параметрами проєктування та обмеженнями.

3. Сформовано лаконізований перелік структурно-логічних елементів, який дає змогу при декомпозиції замінити як самостійно прості, так і сукупно від розділення складних, конструктивні агрегати.

3. Надано приклад проведення декомпозиції трансмісій військових колісних машин, що дає змогу наочно продемонструвати запропонований підхід.

4. Для типових конструктивних схем структурно-логічних елементів надано відповідні структурно-логічні схеми. Це дає змогу, спираючись на положення теорії надійності технічних систем, сформулювати залежності вірогідностей безвідмовної роботи кожного структурно-логічного елемента з подальшою композицією у цільову функцію вірогідності безвідмовної роботи трансмісійної системи.

Список літератури

1. Harald Naunheimer, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz. *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application*. Springer, 2010. 741 p.
2. Stephen P. Radzevich. *Advances in Gear Design and Manufacture*. CRC Press, 2019. 569 p.
3. Яким Р. С. *Приводи транспортних машин: навчальний посібник* [для студентів закладів вищої освіти]. Дрогобич: Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2020. 240 с.
4. Шкарівський Г.В. *Трансмісії мобільних машин*. Київ, ФОП Ямчинський О.В., 2021. 438 с.
5. Мішук Д. О. *Моделювання розподілення енергетичних потоків машин та механізмів: конспект лекцій*. Київ, КНУБА, 2023. 132 с.
6. Yi Zhang, Chris Mi. *Automotive Power Transmission Systems (Automotive Series)*. Wiley, 2018. 452 p.
7. Carl F Zorowski. *Design of Mechanical Power Transmission*.

- Independently published, 2020. 272 p.
8. Evgeniy Trubachev, Natalya Barmina. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions*. Springer, 2025. 567 p.
 9. James Halderman. *Automatic Transmissions and Transaxles*. Pearson, 2017. 320 p.
 10. Ramanamurthy E.V.V., Ramachandran S. *Design of transmission systems*. AIR WALK PUBLICATIONS, 2016. 1038 p.
 11. В.О. Петрик, О.В. Тимошенко «Технічна механіка» Планетарні зубчасті механізми (кінематика, силовий розрахунок, підбір чисел зубців): Метод. вказівки до практ. занять та самот. роботи студ. Київ, ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2011. 32 с.
- References (transliterated)**
1. Harald Naunheimer, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz. *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application*. Springer, 2010. 741 p.
 2. Stephen P. Radzevich. *Advances in Gear Design and Manufacture*. CRC Press, 2019. 569 p.
 3. Yakym R. S. *Pryvody transportnykh mashyn: navchal'nyy posibnyk* [Transport vehicle drives: a training manual]. Drohobych: Redaktsiyno-vydavnychy viddil Drohobyt'skoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Ivana Franka, 2020. 240 p.
 4. Shkarivskyi H.V. *Transmissiyyi mobil'nykh mashyn* [Mobile machine transmissions]. Kyiv, FOP Yamchyn's'kyi O.V., 2021. 438 p.
 5. Mishchuk D. O. *Modelyuvannya rozpodilennya enerhetychnykh potokiv mashyn ta mekhanizmiv : konspekt lektsiy* [Modeling the distribution of energy flows of machines and mechanisms: lecture notes]. Kyiv, KNUBA, 2023. 132 p.
 6. Yi Zhang, Chris Mi. *Automotive Power Transmission Systems (Automotive Series)*. Wiley, 2018. 452 p.
 7. Carl F Zorowski. *Design of Mechanical Power Transmission*. Independently published, 2020. 272 p.
 8. Evgeniy Trubachev, Natalya Barmina. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions*. Springer, 2025. 567 p.
 9. James Halderman. *Automatic Transmissions and Transaxles*. Pearson, 2017. 320 p.
 10. Ramanamurthy E.V.V., Ramachandran S. *Design of transmission systems*. AIR WALK PUBLICATIONS, 2016. 1038 p.
 11. V.O. Petryk, O.V. Tymoshenko. «Tekhnichna mekhanika» Planetarni zubchasti mekhanizmy (kinematyka, sylovyy rozrakhunok, pidbir chysel zubtsiv): Metod. vkazivky do prakt. zanyat' ta samost. roboty stud. [“Technical Mechanics” Planetary gear mechanisms (kinematics, force calculation, selection of the number of teeth): Methodological instructions for practical classes and independent work of students]. Kyiv, IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnik»», 2011. 32 p.

Надійшла (received) 31.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович / Bondarenko Oleksiy – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Устиненко Олександр Віталійович / Ustynenko Oleksandr – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (093) 398-33-83; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org

Протасов Роман Васильович / Protasov Roman – PhD in Eng. S., Словацький технічний університет в Братиславі, старший викладач кафедри автомобільної інженерії та конструювання; м. Братислава, Словаччина; тел.: +421-949-352-655; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1611-0610>; e-mail: roman.protasov@stuba.sk

Клочков Ілля Євгенович / Klochkov Illia – магістр (M.Sc.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4923-2833>; e-mail: s008@tmm-sapr.org

Андрієнко Сергій Володимирович / Andrienko Sergij – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, викладач кафедри комп'ютерної графіки; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-37-24; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4310-3128>; e-mail: andrisergejjsv@gmail.com