

КОШЕЛЬ СЕРГІЙ

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-7481-0186>e-mail: sergey_koshel@ukr.net**КОШЕЛЬ ГАННА**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

<https://orcid.org/0000-0003-1862-1553>e-mail: a_koshel@ukr.net**ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ORCID ID: 0000-0001-6258-0088

e-mail: markzalubovskiy@gmail.com**КОШЕЛЬ ОЛЕКСАНДР**

Київський національний університет технологій та дизайну

e-mail: a_koshel@ukr.net

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ З ТРЬОМА СКЛАДНИМИ ЛАНКАМИ

Виконано структурне дослідження складного плоского механізму четвертого класу з одною ведучою ланкою та рухомим замкнутим контуром у вигляді чотирьохкутника, який утворений трьома ланками, що мають плоскопаралельний рух, та однією ланкою, яка обертається навколо нерухомої вісі. В механізмі контур утворений чотирма ланками: трьома шатунами, два з яких є складними ланками та мають розташування один напроти іншого та одного коромисла, який приймає участь в утворенні трьох кінематичних пар. Структурно сукупність шести ланок та дев'яти кінематичних пар, яка є основою складного механізму відноситься до групи ланок четвертого класу третього порядку. Розроблено можливі варіанти структурних груп ланок четвертого класу третього порядку з замкнутим контуром, в яких ураховувались характер кінематичних пар та їх місце розташування. Для різних варіантів структурних груп ланок отримано структурні формули будов механізмів четвертого класу за допомогою метода структурної зміни дійсної ведучої ланки механізму іншою умовно можливою. Отримані результати дослідження дозволяють визначити послідовність подальших досліджень механізму четвертого класу з однією структурною групою ланок вищого класу в вигляді механізму другого класу з трьома послідовно приєднаними структурними групами ланок відповідного класу.

Ключові слова: структурний аналіз, складний механізм, структурна група ланок, механізм вищого класу.

KOSHEL SERGEY

Kyiv National University of Technology and Design,

KOSHEL GANNA

Open International University of Human Development "Ukraine"

ZALYUBOVSKYI MARK

Open International University of Human Development "Ukraine"

KOSHEL OLEKSANDR

Kyiv National University of Technology and Design

STRUCTURAL ANALYSIS OF FOURTH CLASS MECHANISMS WITH THREE COMPLEX LINKS

A structural study of a complex planar mechanism of the fourth class with one driving link and a moving closed loop was performed. The contour has the form of a quadrangle, which is formed by three links that have plane-parallel movement and one link that rotates around a fixed axis. The circuit is formed by four links: three connecting rods, two of which are complex links and are located opposite each other, and one rocker, which takes part in the formation of three kinematic pairs. Structurally, the set of six links and nine kinematic pairs, which is the basis of a complex mechanism, belongs to the group of links of the fourth class and the third order. We have developed possible variants of structural groups of links of the fourth class of the third order with a closed circuit, in which the nature of kinematic pairs and their location were taken into account. For various variants of structural groups of links, we obtained structural formulas of structures of mechanisms of the fourth class. We used the method of structural change of the actual leading link of the mechanism with another conditionally possible one. The obtained results of the study allow us to determine the sequence of further studies of the fourth-class mechanism with one structural group of higher-class links in the form of a second-class mechanism with three sequentially connected structural groups of the corresponding class.

Key words: structural analysis, complex mechanism, structural group of links, higher class mechanism.

Постановка задачі. В сучасному обладнанні, що застосовується в технологічних процесах індустрії моди використовуються швидкісні механізми з структурними групами ланок вищих класів. Складність руху та взаємодії робочих органів технологічних машин забезпечується багатоланковими механізмами на основі структурних груп ланок третього, четвертого та вище класів. Проектування таких механізмів неможливо без попередніх кінематичних та кінетостатичних досліджень, які, в свою чергу, повинні плануватися та ураховувати особливості структурних груп ланок вищих класів, що покладені в основу їх будов.

В роботі необхідно виконати структурний аналіз механізмів четвертого класу з рухомим замкнутим контуром, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного

коромисла на основі можливих варіантів структурних груп ланок четвертого класу третього порядку та з урахуванням властивості механізмів вищих класів структурно змінювати клас залежно від обраної умовно іншої можливої ведучої ланки механізму.

Аналіз досліджень та публікацій. Проєктування нових або удосконалення існуючих механізмів неможливе без проведення відповідних кінематичних [1] та кінетостатичних [2] досліджень. Таким дослідженням механізмів передують структурний аналіз [3], який дозволяє розробити стратегію та послідовність виконання необхідних кінематичних та динамічних розрахунків. Особливу роль структурний аналіз набуває при проєктуванні складних механізмів четвертого [4] та вище класів, що пояснюється відносною складністю проведення таких досліджень та намаганням його спростити за рахунок оптимізації послідовності дій при його проведенні або визначення такої послідовності, що дозволила б їх виконати.

В ряді робіт приділяється увага питанням аналізу та синтезу плоских механізмів, при чому в роботі [5] виконується кінематичний синтез плоского чотириланкового механізму, а в іншій публікації [6] - плоского важільного шестиланкового механізму високого класу, зокрема, механізмів із наявністю замкнутого контуру [7]. Поза увагою дослідників не залишаються просторові механізми: в роботі [8] розглядаються питання синтезу та аналізу семиланкового просторового механізму машини для обробки деталей легкої промисловості, а в публікації [9] – просторового механізму чотириланковика, автори роботи [10] виконують кінематичний синтез просторового механізму з характерною структурною особливістю для просторової механічної системи, а саме наявністю сферичних кінематичних пар в його структурі.

Виділення невирішених частин. Використання мехатронних систем в сучасних механічних технологіях неможливо без складних механізмів та їх всебічного дослідження. Для механізмів з структурними групами ланок четвертого та вище класів існує проблема недостатнього їх вивчення, в літературних джерелах спостерігається відсутність необхідної кількості досліджень, що пояснюється відносною складністю та відсутністю універсального підходу для їх проведення.

Механізми четвертого класу з замкнутим рухомим контуром, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного коромисла не мають певної класифікації, яка, наприклад, існує для механізмів другого класу, що ускладнює проведення їх всебічного структурного аналізу та пов'язаних з ним подальших кінематичних та динамічних досліджень. Якщо при цьому урахувати різноманіття механізмів четвертого класу, що можна структурно синтезувати на основі різних видів структурної групи ланок четвертого класу третього порядку, то стає зрозумілим актуальність роботи, яка дозволить спростити та визначити послідовність проведення подальших досліджень за допомогою метода умовної заміни ведучої ланки механізму та, як наслідок, проведення аналізу механізму четвертого класу в спосіб, що використовується для досліджень механізмів третього або другого класів.

Формулювання цілей. Мета даної роботи полягає в тому, щоби розглянути різні варіанти механізму четвертого класу з замкнутим рухомим контуром, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного коромисла на основі можливих варіантів розташування поступальних та обертальних кінематичних пар в структурній групі ланок четвертого класу третього порядку та отримати структурні формули будов для випадку умовної зміни ведучої ланки з варіантів інших структурно можливих початкових механізмів. Отримані формули дозволять знайти оптимальний варіант для планування та проведення подальшого дослідження будь якого варіанту механізму четвертого класу з трьома складними ланками в їх структурі.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлена складна плоска шарнірно-важільна група ланок четвертого класу третього порядку, яка складається з ланок $2 \div 7$, серед яких ланки 3, 4, 6 мають вигляд складних ланок, а ланки 2, 5, 7 – простих, що з'єднані внутрішніми обертальними парами $A_2 \div A_7$ та мають зовнішні обертальні пари A_1, A_8, A_9 , за допомогою яких група приєднується до ведучої ланки 1 початкового механізму (парою A_1) та нерухомої ланки 0 (парами A_8, A_9). Механізм першого класу (сукупність ланок 0, 1) разом з структурною групою шістьох ланок $2 \div 7$ та дев'ятьма кінематичними парами п'ятого класу $A_1 \div A_9$ утворюють механізм четвертого класу з одним ступенем рухомості по відношенню до нерухомого корпусу, формула будови якого: 1клас (ланки 0,1) \rightarrow 4клас 3порядок (ланки $2 \div 7$).

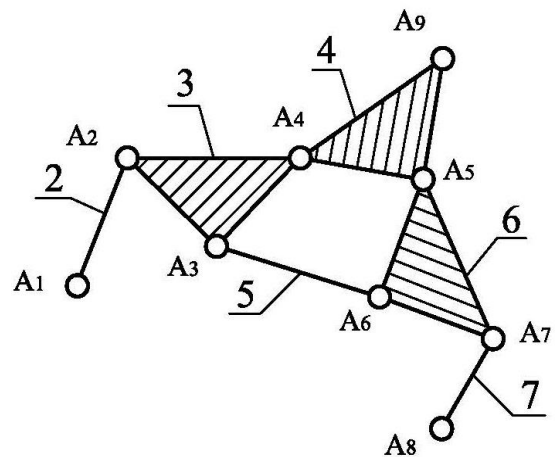


Рис. 1. Структурна група ланок 4-го класу з обертальними кінематичними парами

На рис. 2–5 представлені різні варіанти структурних груп ланок четвертого класу третього порядку з рухомим замкнутим контуром, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного коромисла на основі можливих варіантів розташування поступальних та обертальних кінематичних пар в структурі групи. Якщо в варіантах структурних груп, що наведені на рис. 1–5 виконати заміну обертальних пар на поступальні та навпаки, отримаємо решту модифікації структурних груп четвертого класу третього порядку.

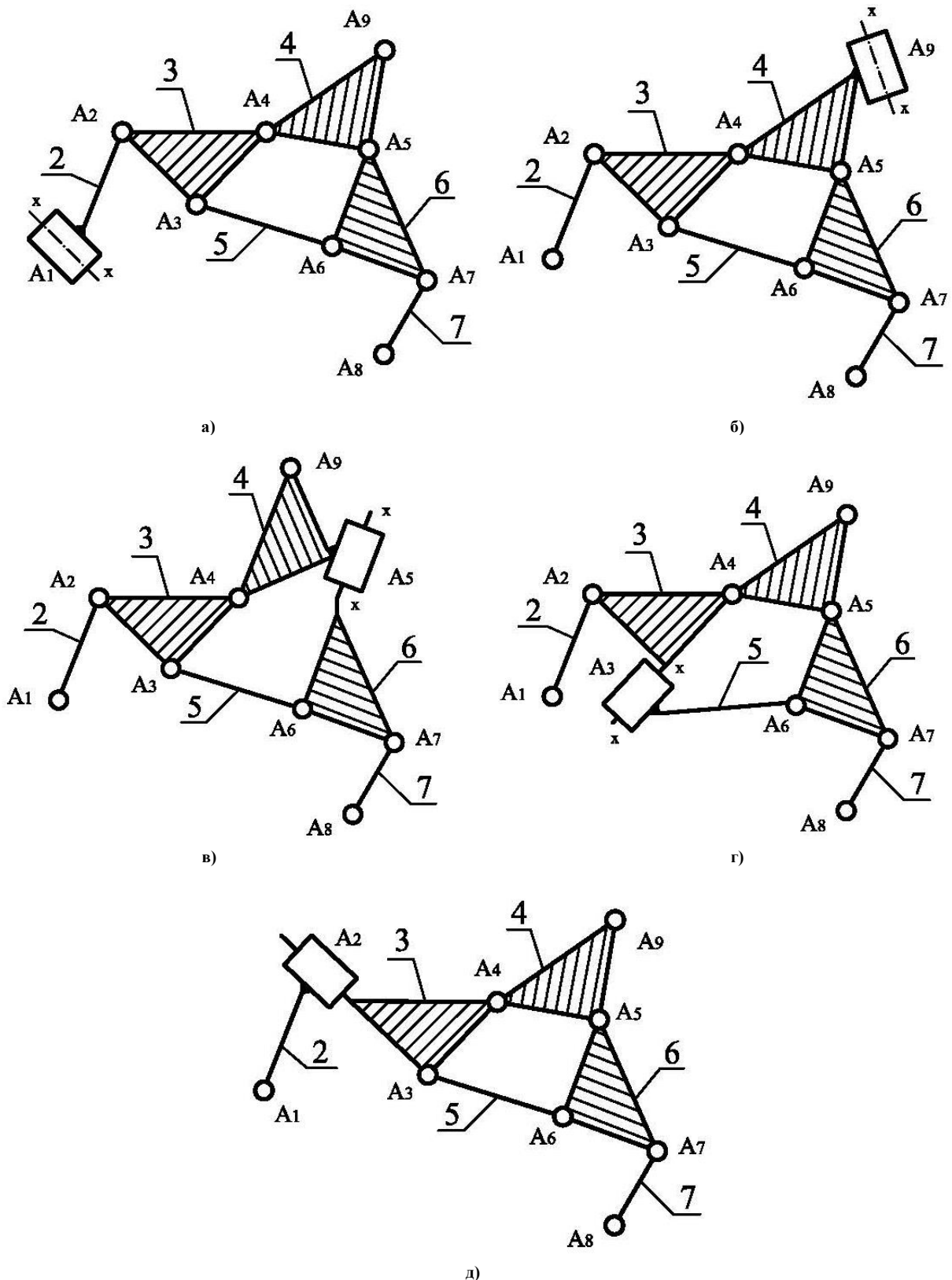


Рис. 2. Структурна група ланок 4-го класу з однією поступальною та іншими обертальними кінематичними парами: а, б – поступальна пара – зовнішня; в, г, д – поступальна пара – внутрішня

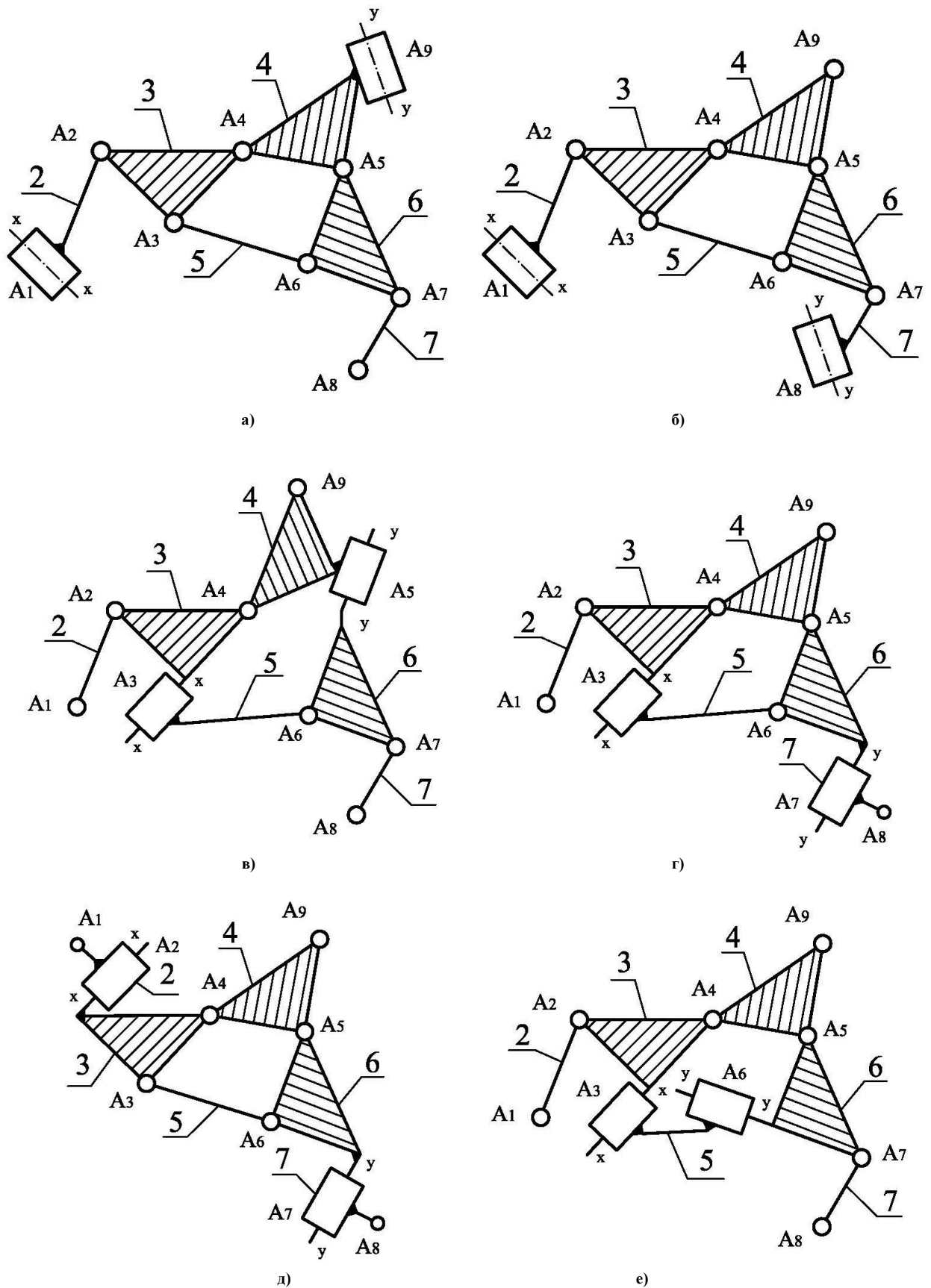


Рис. 3. Структурна група ланок 4-го класу з двома поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy не є паралельними): а, б – поступальні пари – зовнішні; в, г, д, е – поступальні пари – внутрішні

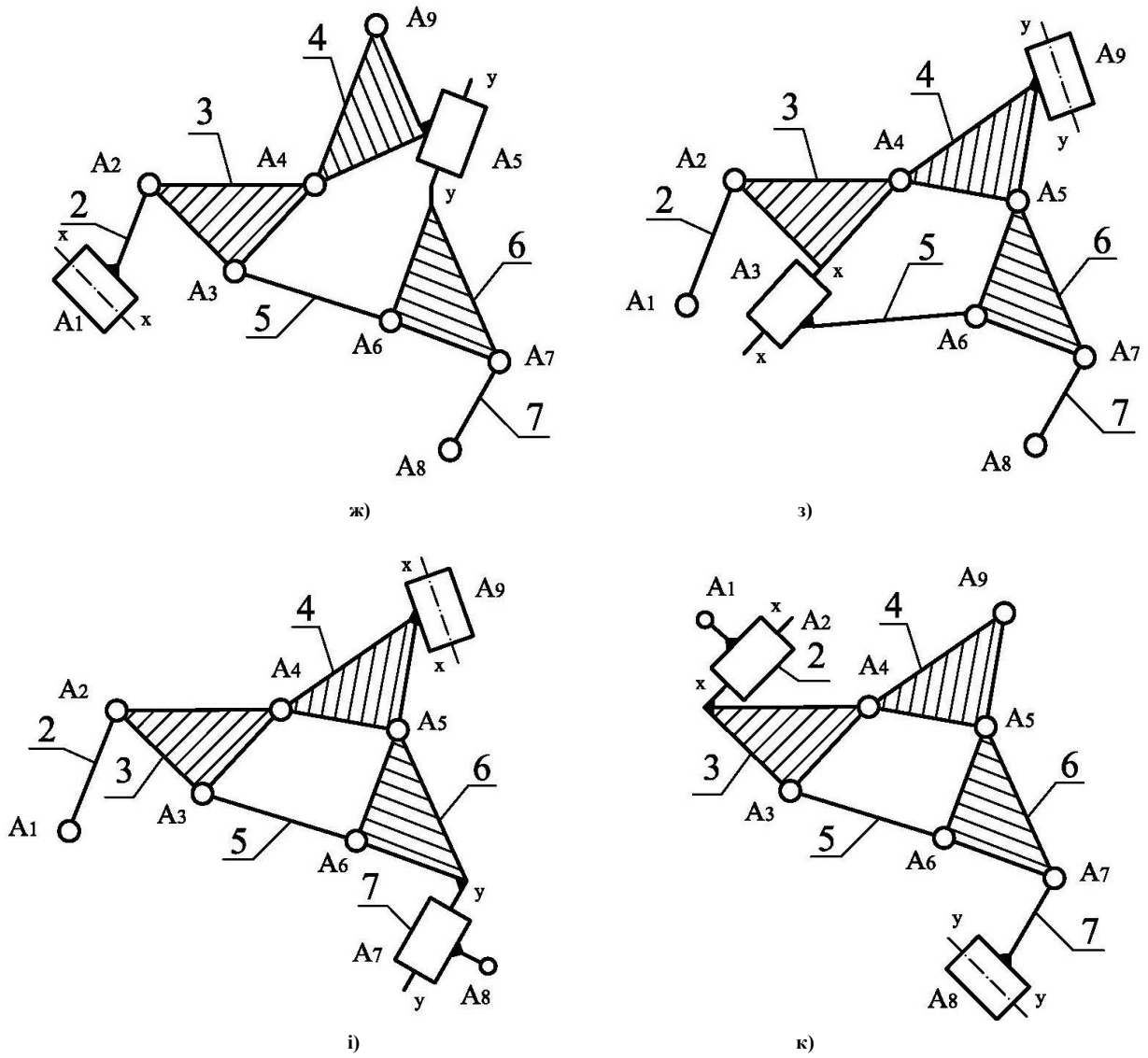


Рис. 3. Структурна група ланок 4-го класу з двома поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy не є паралельними): ж, з, і, к – одна поступальна пара – внутрішня, одна – зовнішня (продовження)

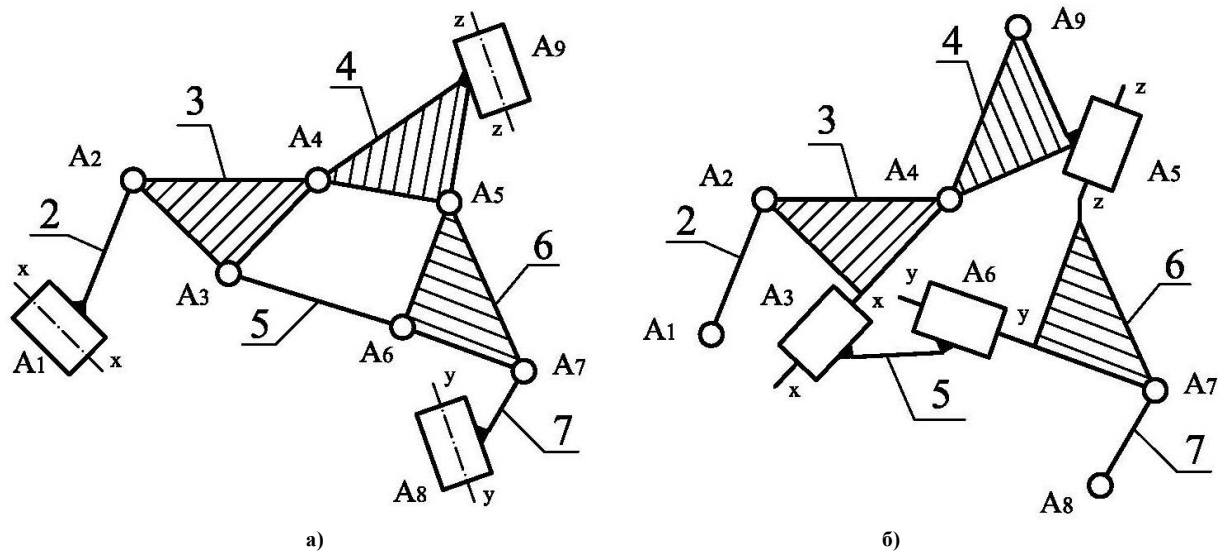


Рис. 4. Структурна група ланок 4-го класу з трьома поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz не є паралельними): а – поступальні пари – зовнішні; б – поступальні пари – внутрішні

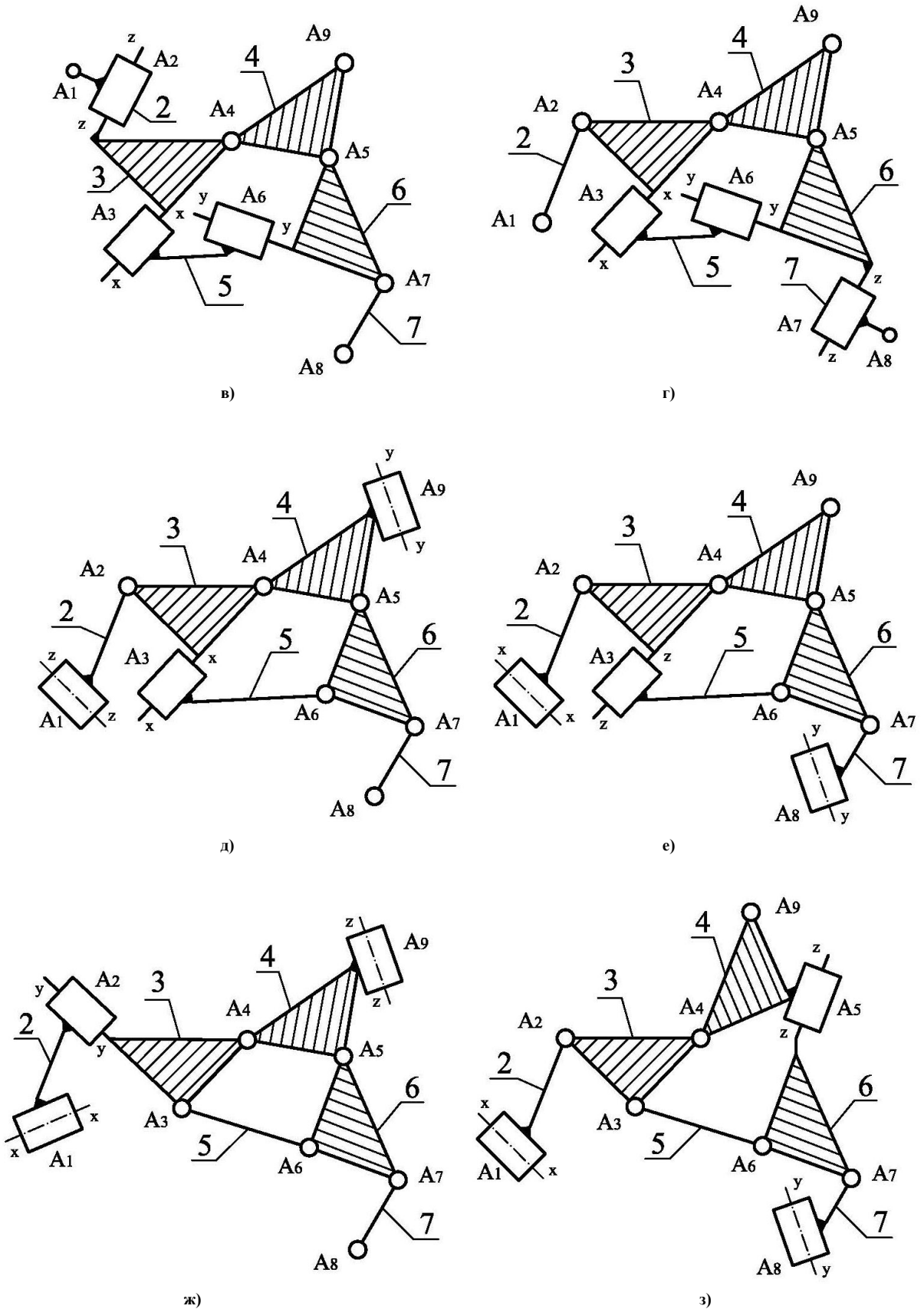


Рис. 4. Структурна група ланок 4-го класу з трьома поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz не є паралельними): в, г, – поступальні пари – внутрішні; д, е, ж, з – дві зовнішні поступальні пари, одна – внутрішня (продовження)

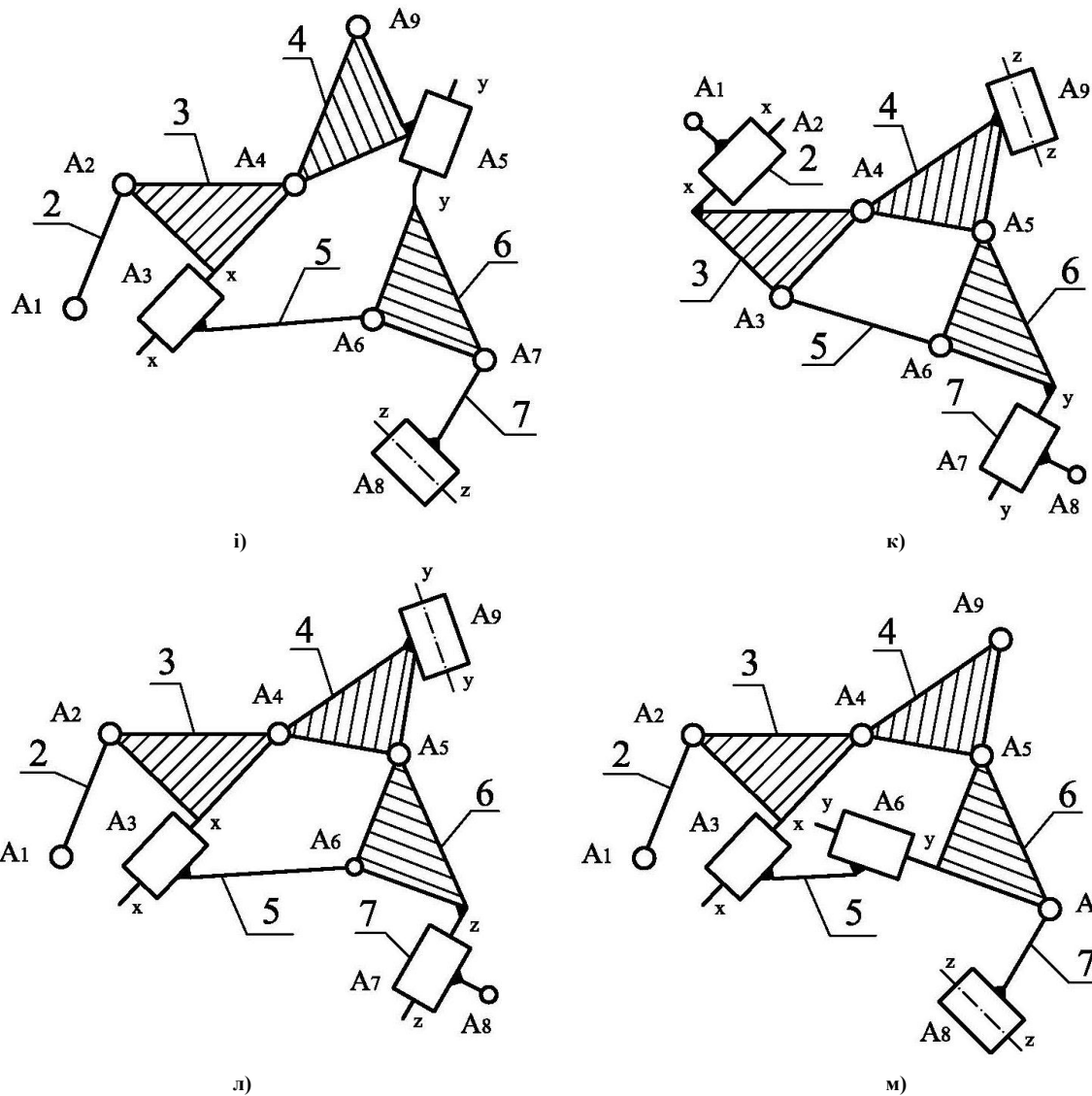


Рис. 4. Структурна група ланок 4-го класу з трьома поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz не є паралельними): і, к, л, м - одна зовнішня поступальна пара, дві – внутрішні (продовження)

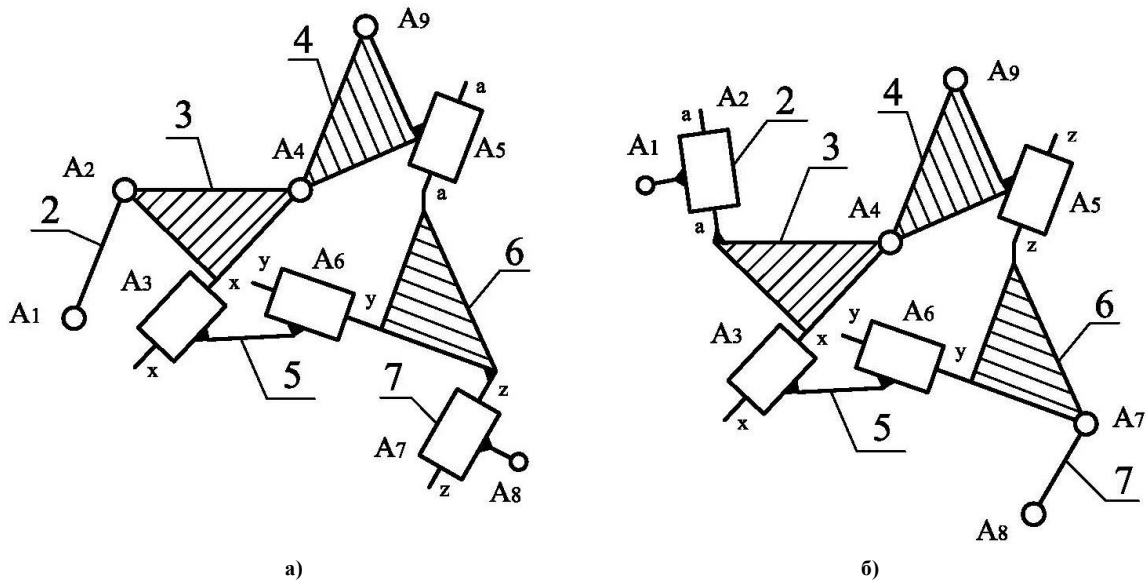


Рис. 5. Структурна група ланок 4-го класу з чотирма поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz , aa не є паралельними): а, б – поступальні пари – внутрішні

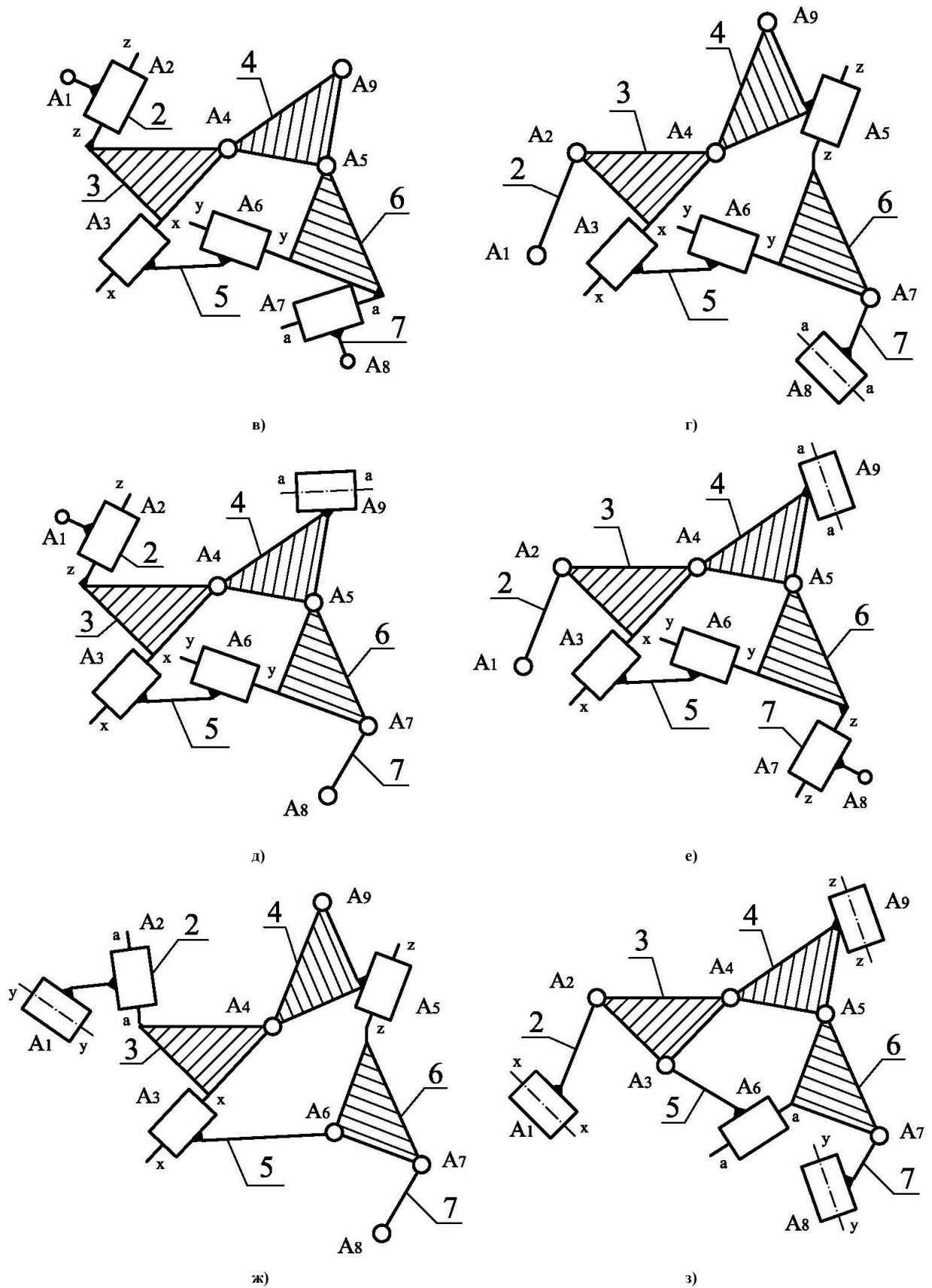


Рис. 5. Структурна група ланок 4-го класу з чотирма поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz , aa не є паралельними): в – поступальні пари – внутрішні; г, д, е, ж – три внутрішні поступальні пари, одна – зовнішня; з – три зовнішні поступальні пари, одна – внутрішня (продовження)

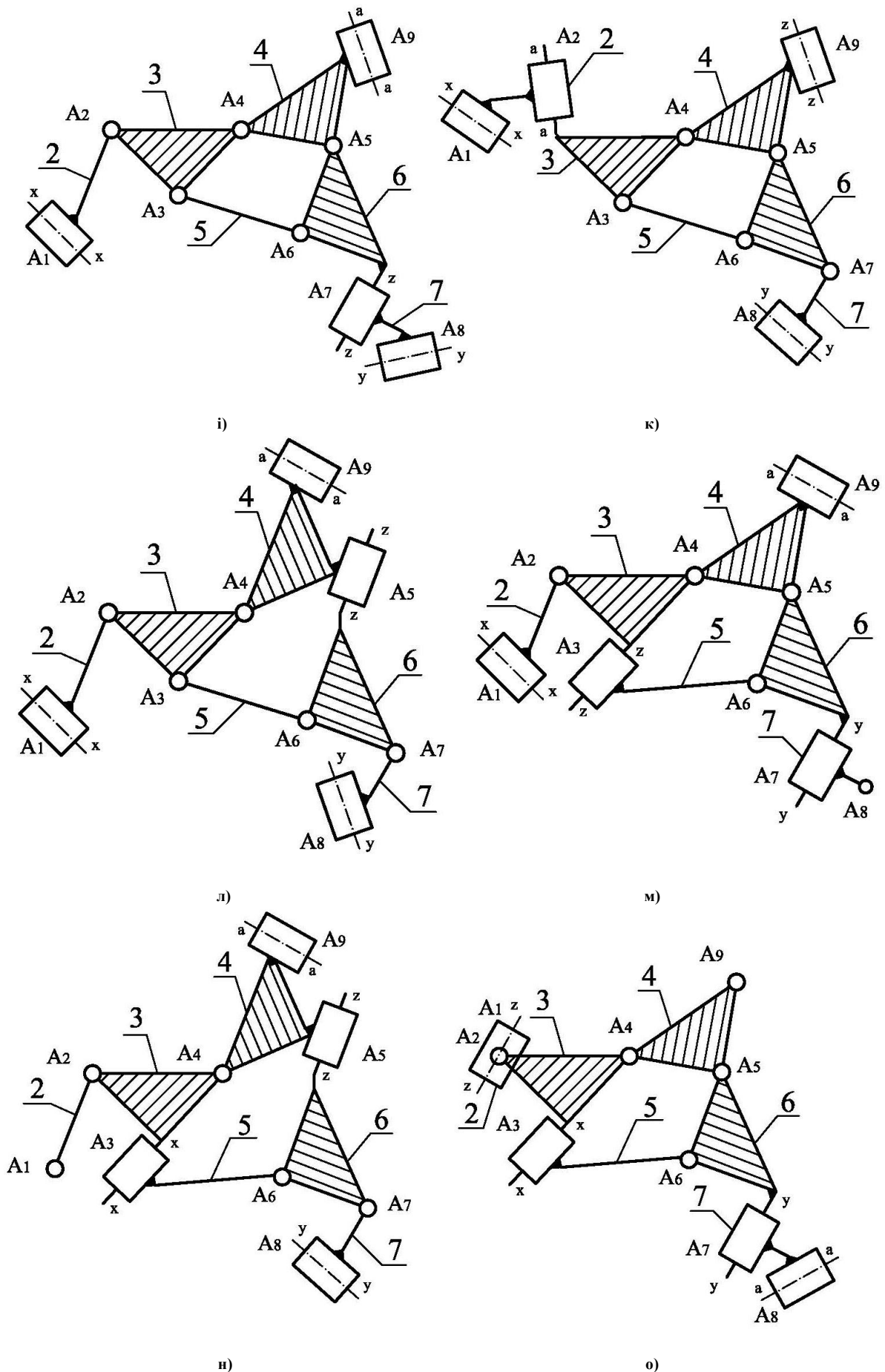


Рис. 5. Структурна група ланок 4-го класу з чотирма поступальними та іншими обертовими кінематичними парами (вісі xx , yy , zz , aa не є паралельними): і, к, л – три зовнішні поступальні пари, одна – внутрішня; м, н, о – дві зовнішні поступальні пари, дві – внутрішні (продовження)

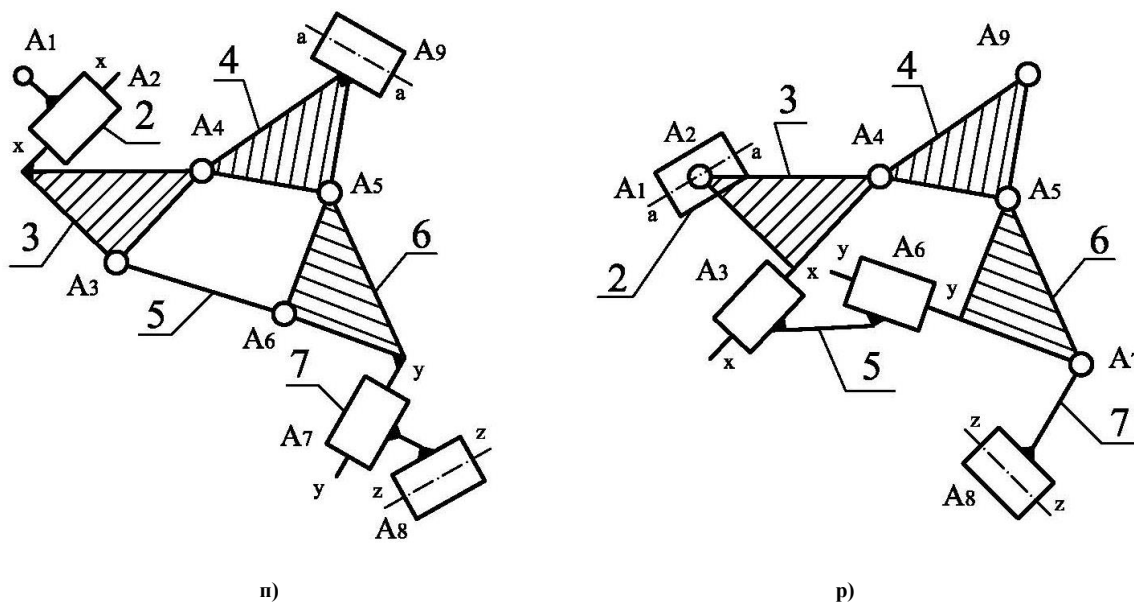


Рис. 5. Структурна група ланок 4-го класу з чотирма поступальними та іншими обертальними кінематичними парами (вісі xx , yy , zz , aa не є паралельними): п, р – дві зовнішні поступальні пари, дві – внутрішні (продовження)

Для зручності результати дослідження наведені в таблиці. Формули будов механізмів, які представлені в таблиці записані для випадку, якщо умовно іншою можливою ведучою ланкою механізму четвертого класу є ланка 7.

З аналізу наведених в таблиці структурних формул будови механізму четвертого класу на основі модифікацій структурної групи ланок четвертого класу третього порядку з обраною іншою можливою ведучою ланкою стверджуємо, що механізм четвертого класу з замкнутим рухомим контуром, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного коромисла можна досліджувати в послідовності, яка обумовлена формулою будови механізму другого класу для всіх можливих варіантів структурних груп четвертого класу третього порядку.

Структурні складові механізмів з обраним умовно іншим початковим механізмом

Для варіанту структурної групи ланок на рис. 1			
1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
Для варіантів структурних груп ланок на рис. 2			
а) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
б) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
в) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
г) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
д) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
Для варіантів структурних груп ланок на рис. 3			
а) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
б) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
в) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
г) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
д) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
е) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
ж) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)

з) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
і) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
к) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
Для варіантів структурних груп ланок на рис. 4			
а) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
б) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
в) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
г) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
д) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
е) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
ж) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	5 вид (1,2)
з) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
і) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
к) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
л) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
м) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
Для варіантів структурних груп ланок на рис. 5			
а) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	5 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
б) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
в) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
г) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
д) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
е) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
ж) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	3 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	5 вид (1,2)
з) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	2 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
і) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
к) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	5 вид (1,2)
л) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	5 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
м) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
н) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	5 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	1 вид (1,2)
о) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	2 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	3 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)
п) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	4 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	1 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	2 вид (1,2)
р) 1 клас (0,7) → 2 клас 2 порядок	1 вид (4,6) → 2 клас 2 порядок	5 вид (3,5) → 2 клас 2 порядок	3 вид (1,2)

Висновки

Наявність в структурі механізму четвертого класу рухомого замкнутого контуру, що утворений трьома шатунами, два з яких мають вигляд складних ланок та одного складного коромисла дозволила

виконати його структурний аналіз за допомогою умовної зміни ведучої ланки механізму для різних структурних варіантів групи ланок четвертого класу третього порядку та отримати варіанти структурних формул будов, які зробили можливим виконання подальшого аналізу механізмів четвертого класу методами дослідження механізмів другого класу. Отримані результати послідовності проведення структурного аналізу можна рекомендувати для виконання аналогічних досліджень складних плоских механізмів четвертого та вище класів.

Література

1. Cheng Z., Li Q. Kinematic analysis of a 4-SSSS compliant mechanism for large-deflection motion. *Mechanism and Machine Theory*, 2021. 164 p.
2. Дворжак В. М. Силовий аналіз механізму коливального руху вушкових голок основов'язальної машини. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*. 2019. № 3 (134). С. 26-35.
3. Koshel' S. O., Dvorzhak V. M., Koshel' G. V., Zalyubovskiy M. G. Kinematic Analysis of Complex Planar Mechanisms of Higher Classes. *Int. Appl. Mech.* 2022. 58, N 1. P. 111–122.
4. Дворжак В. М. Застосування механізму четвертого класу для приводу вушкових голок основов'язальної машини. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*. 2020. № 3 (146). С. 15-24.
5. Zawodniok M., Jezowski J. Kinematic synthesis of planar four-bar mechanism with prescribed workspace by Bézier curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2020. 152 p.
6. Joldasbekov S., Ibraev S., Zhauyt A., Nurmagambetova A., Imanbaeva N. Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. *Middle-East. J. of Sci. Research*. 2014. 21, N 12. P.2339–2345.
7. Li Y.Q., Zhang Y., Zhang L.J. A new method for type synthesis of 2R1T and 2T1R 3-DOF redundant actuated parallel mechanisms with closed loop units. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, p. 33-78.
8. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I.V., Koshel' S.O., Koshel' G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *Int. Appl. Mech.* 2021. 57, N 4. P. 466 – 476.
9. Stachel H., Arnold A. On the synthesis of spatial four-bar linkages. *Mechanism and Machine Theory*, 2021. 160 p.
10. Kosbolov Serikbay, Zhauyt Algazy, Kosbolov Serikbol Kinematic synthesis of spatial linkages with spherical pairs. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016. Vol. 54, Issue 1, p. 75-85.

References

1. Cheng Z., Li Q. Kinematic analysis of a 4-SSSS compliant mechanism for large-deflection motion. *Mechanism and Machine Theory*, 2021. 164 p.
2. Dvorzhak V. M. Sylovyi analiz mekhanizmu kolyvalnoho rukhu vushkovykh holok osnovoviazalnoi mashyny. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky*. 2019. № 3 (134). S. 26-35.
3. Koshel S. O., Dvorzhak V. M., Koshel G. V., Zalyubovskiy M. G. Kinematic Analysis of Complex Planar Mechanisms of Higher Classes. *Int. Appl. Mech.* 2022. 58, N 1. P. 111–122.
4. Dvorzhak V. M. Zastosuvannia mekhanizmu chetvertoho klasu dlia pryvodu vushkovykh holok osnovoviazalnoi mashyny. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky*. 2020. № 3 (146). S. 15-24.
5. Zawodniok M., Jezowski J. Kinematic synthesis of planar four-bar mechanism with prescribed workspace by Bézier curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2020. 152 p.
6. Joldasbekov S., Ibraev S., Zhauyt A., Nurmagambetova A., Imanbaeva N. Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. *Middle-East. J. of Sci. Research*. 2014. 21, N 12. P.2339–2345.
7. Li Y.Q., Zhang Y., Zhang L.J. A new method for type synthesis of 2R1T and 2T1R 3-DOF redundant actuated parallel mechanisms with closed loop units. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, p. 33-78.
8. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I.V., Koshel' S.O., Koshel' G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *Int. Appl. Mech.* 2021. 57, N 4. P. 466 – 476.
9. Stachel H., Arnold A. On the synthesis of spatial four-bar linkages. *Mechanism and Machine Theory*, 2021. 160 p.
10. Kosbolov Serikbay, Zhauyt Algazy, Kosbolov Serikbol Kinematic synthesis of spatial linkages with spherical pairs. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016. Vol. 54, Issue 1, p. 75-85.