

Шостачук Андрій Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри прикладної механіки і комп'ютерно-інтегрованих технологій
Житомирський державний технологічний університет, м.Житомир, Україна

ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР В НАВЧАЛЬНІЙ ДИСЦИПЛІНІ «ТЕОРІЯ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН»

У статті обґрунтовано важливість детального вивчення класифікації кінематичних пар, як одного з основних об'єктів дослідження в теорії механізмів і машин. Запропоновано порядок розгляду кінематичних пар, який сприяє найбільш швидкому засвоєнню класифікації студентами. Класи кінематичних пар з кількістю в'язей (або дозволених рухів) відмінною від одиниці, доцільно пояснювати за допомогою методу оберненого руху. Запропоновано використовувати 3-D моделі з наведенням прикладів використання даних кінематичних пар в робочих машинах.

Ключові слова: геометрична модель, кінематична пара, кінематичні в'язі, механізм, робот

Вступ. Вивчення курсу «Теорія механізмів і машин» починають з розгляду нових для студентів об'єктів дослідження та їх класифікацій. До таких об'єктів відносять деталі, ланки, кінематичні пари, кінематичні ланцюги, структурні групи (групи Асура), механізми. Доволі простими для розуміння є поняття деталі та ланки, але велика кількість класів кінематичних пар, їх можлива взаємозаміна в механізмах, збіг кількох кінематичних пар в одному геометричному центрі, вплив класу кінематичної пари на: форму та площу контакту двох ланок тощо значно утруднюють використання інформації про кінематичні пари при структурному аналізі, силовому розрахунку тощо. Тому актуальним в теорії механізмів і машин при вивченні кінематичних пар та їх класифікації є застосування таких геометричних моделей, які б дозволили розглядати кінематичні пари одночасно з позначенням накладених зв'язків та можливих відносних рухів, різноманітні конструктивні виконання однієї і тієї ж кінематичної пари тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день практично в усіх підручниках з теорії механізмів і машин прийнята класифікація кінематичних пар за І.І. Артоблевським [1, с.21-22], відповідно до якої клас кінематичної пари дорівнює кількості зв'язків, накладених на взаємний рух ланок при утворенні ними кінематичної пари. Також наводиться класифікація за В.В. Добровольським, в рамках якої клас кінематичної пари дорівнює, навпаки, числу ступенів вільності кінематичної пари [1, с.22]. Але в формулах П.Л. Чебишева та Сомова-Малишева для розрахунку ступеню вільності кінематичного ланцюга використовується зазвичай класифікація І.І. Артоблевського. Очевидно, обидві класифікації є рівноцінними, особливо, враховуючи, що при розгляді студентами кінематичних пар з малою кількістю відносних рухів ланок зручно вказувати саме ці рухи, а для кінематичних пар з більшою кількістю відносних рухів зручно зазначати, навпаки, накладені зв'язки.

Наступною особливістю розгляду кінематичних пар в сучасних підручниках є застосування їх плоских умовних зображень, що було загалом цілком виправданим в попередні десятиліття. В першу чергу, це монографії авторів Я.Т.Кіницького [1, с.23-24], В.В.Бурлака, С.І.Кучеренко, Д.І.Мазоренко, Л.М.Тищенко. [2, с.15], О.П.Заховайка [3, с.12-14], М.З.Коловського, А.Н.Евграфова, Ю.А.Семенова, А.В.Слоуща [4, с.8-10], І.І.Артоблевського [5, с.].

Незважаючи на те, що більшість механізмів, які використовуються в сучасних машинах є плоскими, невпинно збільшується доля і значення просторових механізмів, які застосовуються, в першу чергу,

в роботах і маніпуляторах. В підручниках та монографіях, присвячених роботам [6] зазвичай використовуються плоскі малюнки для розгляду проблем кінематики та динаміки, що значно ускладнює розуміння просторової картини. Це, в першу чергу, аналіз геометричних і кінематичних характеристик роботів, проектування роботів тощо. Таким чином, на сьогодні практично відсутні підручники та навчальні посібники, де при вивченні кінематичних пар розглядалися 3-D моделі із зазначенням механізмів та машин, де дані кінематичні пари застосовуються (автомобілебудування, авіакосмічна промисловість, зварювання, складальне виробництво, технологічні лінії в легкій та харчовій промисловості тощо).

Дороніним Ф.А. [7, с.7-8, 12] при розгляді кінематики плоского маніпулятора паралельної структури з трьома ступенями вільності як схема самого маніпулятора, так і зображення кінематичних характеристик представлені на плоских рисунках в системі координат (x-y), що суттєво утруднюють сприймання. Востріков В.Н., Романцев А.А. в роботі [8, с.34-36] розглядають синтез просторових чотириланкових шарнірних механізмів, який включає, зокрема, процес заміни кінематичної пари сферичної з пальцем на сферичну, обертальну на сферичну з пальцем, також за допомогою плоских рисунків. На них обертальні пари, осі яких знаходяться в площині малюнка, нахилені одна до одної під деяким кутом, тому траєкторії ланок-втулок, перпендикулярні до площини малюнку, не є паралельними між собою, приєднання ж далі сферичних пар з трьома ступенями вільності кожна ускладнює можливість просторового представлення як траєкторій так і напрямків швидкостей та прискорень.

В роботах А.Ф.Крайнева [9, с.195, 196], С.М.Кожевникова, Я.І.Єсипенка, та Я.М.Раскіна [10, с.129-131] велика кількість конструкцій просторових механізмів також представлена на плоских малюнках, що значно утруднює розуміння описання їх роботи.

Метою даної статті є обґрунтування використання геометричних моделей при вивченні студентами інженерних спеціальностей кінематичних пар та їх класифікацій в навчальній дисципліні «Теорія механізмів і машин».

Викладення основного матеріалу дослідження. Кінематичні пари та їх класифікації, як було зазначено вище, є новими об'єктами розгляду для студентів інженерних спеціальностей в курсі «Теорія механізмів і машин». Тому необхідно забезпечити розуміння студентами цієї інформації для можливості розгляду далі таких тем, як ступінь вільності механізму (формули Чебишева та Сомова-Малишева), заміна вищих кінематичних пар нижчими, розрахунок реакцій в кінематичних парах в ході силового розрахунку ме-

ханізмів тощо. Основними особливостями, на які необхідно звернути увагу при розгляді кінематичних пар, є теоретичний контакт (точка, лінія або поверхня), дозволені відносні рухи ланок, які утворюють кінематичну пару та застосування даних кінематичних пар в механізмах та машинах (технологічних, транспортних, вимірвальних і т. ін.).

Деякі з кінематичних пар рідко використовуються в сучасних механізмах, але, на наш погляд, необхідно розглядати всі можливі кінематичні пари, які відносяться до кожного класу не тільки тому, що в деяких механізмах така пара може, хоч і зрідка, мати місце, але і для того, щоб у студента сформувалася повна система кінематичних пар в сучасних механізмах з їх дозволеними відносними рухами, накладеними зв'язками, контактними поверхнями.

Наприклад, така кінематична пара I класу, як «площина-сфера» (рис. 1,а), не є характерною для сучасних механізмів, але вона є легкою для розуміння студентами при вивченні класифікації кінематичних пар, оскільки тут достатньо вказати тільки один заборонений рух – поступальний вздовж вертикальної осі, перпендикулярної площині (рис. 1, а). Інші 5 дозволених рухів – вздовж взаємно перпендикулярних осей, які лежать в площині та обертальні рухи навколо трьох осей декартового простору. Обертальна та поступальна пари, обидві V класу, навпаки, є одними з найпоширеніших в сучасних механізмах, вони також є нескладними для розуміння, оскільки в цих кінематичних парах має місце тільки один дозволений рух – відповідно обертальний та поступальний однієї ланки відносно іншої (рис. 1,б,в).

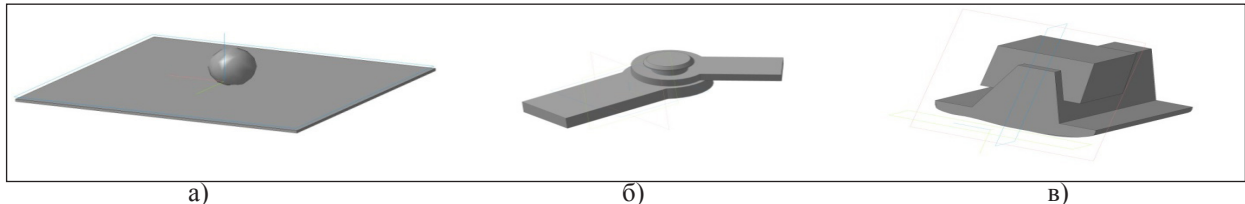


Рис.1. Кінематичні пари I класу з одним накладеним зв'язком (а – «сфера-площина») та V класу з одним дозволеним рухом (б – обертальна та в – поступальна)

Кінематичні пари «площина-циліндр» (II клас), «площина-призма» (III клас) та циліндрична пара (або пара вал-втулка, IV клас) є теж тими кінематичними парами, які рідко зустрічаються в сучасних механізмах, в той же час пояснення студентами цієї інформації вимагає додаткових пояснень (рис.2),

оскільки для визначення класу даної кінематичної пари необхідно з'ясувати можливі поступальні та обертальні рухи відносно трьох декартових осей, пов'язаних зі нерухомою площиною (рис.2,а,б) або з валом (втулкою, рис.2,в).

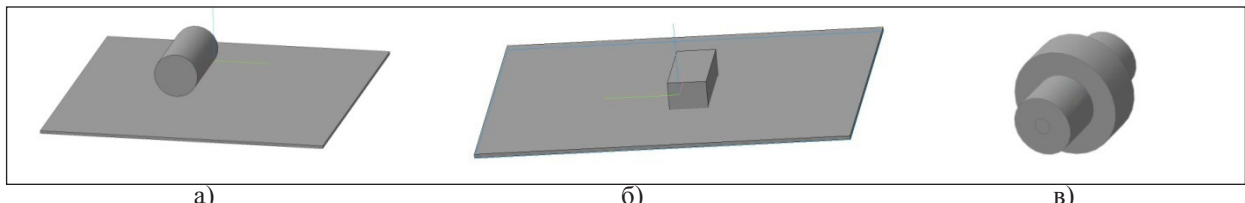


Рис.2. Кінематичні II – IV класів: а – «площина-циліндр», б – «площина-призма», в – циліндрична («вал-втулка»)

Більш характерними для механізмів є сферична кінематична пара: (III клас), кінематичні пари IV класу (сферична з пальцем, зубчасте зачеплення, циліндрична, кулачок-штовхач).

Ці кінематичні пари часто викликають певні труднощі у студентів, оскільки для того, щоб визначити клас такої кінематичної пари, треба подумки уявити та порахувати можливі рухи (або зв'язки) однієї ланки відносно іншої. Алгоритм таких дій доцільно, на наш погляд представляти поетапно, щоб забез-

печити розуміння, а не механічне запам'ятовування відповідності кінематичної пари певному класу. Для прикладу розглянемо дві кінематичні пари IV класу – «кулачок-штовхач» та зубчасте зачеплення. В кінематичній парі «кулачок-штовхач» кулачок здійснює відносно стояка обертальний рух з деякою кутовою швидкістю ω_1 , а штовхач рухається поступально вздовж вертикальних напрямних, переміщуючись на величину s (рис.3).

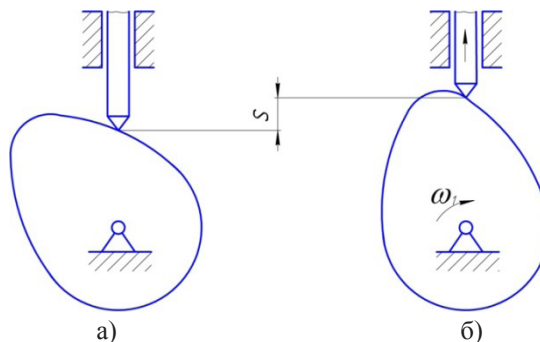


Рис.3. Переміщення ланок кінематичної пари «кулачок-штовхач» відносно нерухомих напрямних

Для того, щоб визначити клас даної кінематичної пари, використаємо метод оберненого руху. Необхід-

но встановити кількість зв'язків, які накладено вищою кінематичною парою на рух штовхача відносно

кулачка (або навпаки, кулачка відносно штовхача). Оскільки кількість зв'язків між ланками плоскої пари є більшою за 3, в даному випадку зручно виявити не кількість зв'язків, а кількість відносних рухів однієї ланки відносно іншої, тим більше, що робота кулачкового механізму є зрозумілою з плоского малюнка. Надамо обертального руху кулачку і штовхачу з кутовою швидкістю $-\omega_1$, при цьому відносний рух ланок не зміниться. Тим самим зафіксуємо одну з ланок, а саме, кулачок і розглянемо, які рухи здійснює штовхач для того, щоб отримати нове положення, по-

казане на рис. 3,б. Спочатку перемістимо штовхач з початкового положення (рис.4,а) на деяку величину вздовж напрямних (рис.4,б), після чого повернемо напрямні при нерухомотому відносно них штовхачі на деякий кут до контакту кулачка і штовхача (рис.4,в). При цьому відносні положення кулачка і штовхача на рис. 3,б та 4,в співпадають. На рис.4,г показано поворот кінематичної пари «кулачок-штовхач» разом з напрямними на деякий кут для візуального співставлення з рис. 3,б.

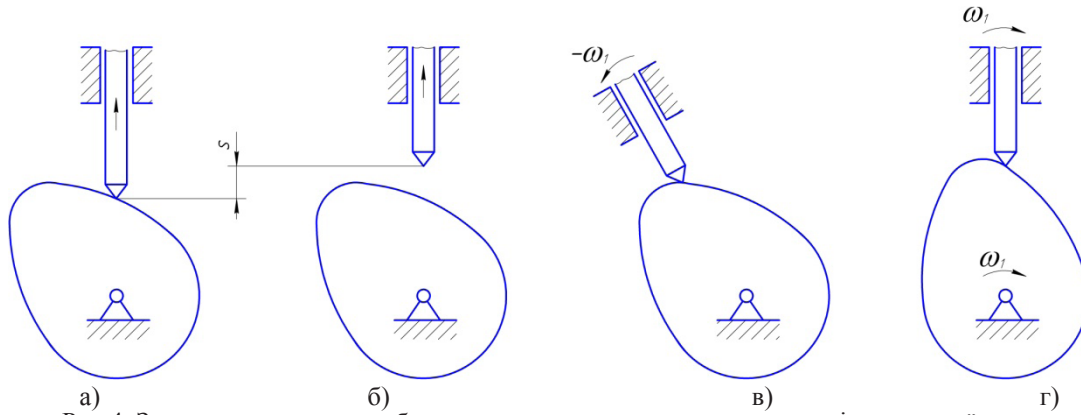


Рис.4. Застосування методу оберненого руху для визначення класу кінематичної пари «кулачок-штовхач»

Таким чином, штовхач здійснює два рухи відносно кулачка – поступальний вздовж напрямних та обертальний рух самих напрямних навколо центра обертання кулачка. Кількість накладених при утворенні даної кінематичної пари зв'язків буде дорівнювати: $S=6-2=4$, значить, кінематична пара «кулачок-штовхач» є парою IV класу. Аналогічний алгоритм використаємо при визначенні класу кінематичної пари «зубчасте зачеплення». Розглянемо зубчасту пару, коли два колеса, які входять в зачеплення, обертаються навколо нерухомих осей з кутовими швидкостями ω_1 , та ω_2 . Для того, щоб визначити клас кінематичної пари «зубчасте зачеплення», надамо зубчастим колесам обертального руху з кутовою швидкістю $-\omega_1$, тоді одне з коліс, яке оберталось з кутовою швидкістю ω_1 , стане нерухомих (оскільки $\omega_1 - \omega_1 = 0$), а вісь другого колеса почне додатково обертатися навколо осі нерухомого колеса з кутовою швидкістю $-\omega_1$, тобто рухоме колесо буде здійснювати відносно нерухомого два рухи: обертальний навколо власної рухомої осі з кутовою швидкістю $-\omega_2$ та обертальний навколо осі нерухомого колеса з кутовою швидкістю $-\omega_1$. Таким чином, кількість накладених зв'язків також дорівнює 4, тобто зубчасте зачеплення є кінематичною парою IV класу.

Також студенти повинні розуміти неможливість застосування структурної формули кінематичного ланцюга загального виду (формули Сомова-Малишева) для визначення ступеню рухомості плоских ланцюгів, хоча плоскі ланцюги і є підмножиною всієї множини кінематичних ланцюгів. Розглянемо, наприклад, чотириланковий плоский кінематичний ланцюг, де всі кінематичні пари є обертальними. Ступінь рухомості такого механізму за формулою Чебишева для плоских механізмів буде визначатись:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1$$

що відповідає даному механізму.

Ступінь рухомості цього ж механізму за формулою загального виду:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 4 - 0 = -2$$

Значення -2 суперечить досвіду, це можна пояснити наступним. Розглянемо визначення ступеню рухомості W механізму I-го класу за формулою Сомова-Малишева. Маємо: $W=6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1$, що відповідає дійсності. Але для структурної групи II класу: $W=6 \cdot 2 - 5 \cdot 3 = -3$. Тобто формально структурна група II класу відповідно до формули Сомова-Малишева є нерухомою, що не відповідає дійсності для площини, тут необхідно застосовувати формулу Чебишева для плоских механізмів, яка дає справедливий результат: $W=3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$. Таким чином, суперечливий результат в структурній формулі, де враховуються кінематичні пари, доцільно пояснювати, аналізуючи процес приєднання до механізму I класу структурних груп (груп Ассур).

Викладений матеріал дозволяє зробити наступні висновки.

1. Розглянуто складнощі, які виникають у студентів при вивченні класифікації кінематичних пар. Запропоновано в першу чергу знайомити студентів з кінематичними парами, які мають мінімальну кількість в'язей або дозволених відносних рухів (кінематичні пари I та V класів).
2. Для розгляду кінематичних пар I та V класів запропоновано використовувати тримірні моделі із зазначенням їх різноманітних конструктивних виконань та використання в робочих машинах (металорізальні верстати, автомобілі тощо).
3. При розгляді кінематичних пар II – IV класів запропоновано використовувати методу оберненого руху, при якому одна з ланок уявно зупиняється і розглядається рухи іншої ланки відносно уявно зупиненої.
4. Показана неможливість використання структурної формули механізму загального виду (формули Сомова-Малишева) при проведенні структурного аналізу плоских механізмів.

Список використаної літератури

1. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. – К.: Наукова думка. – 2002. – 661 с.
2. Основи теорії механізмів і машин: [курс лекцій. підручник] / В.В.Бурлака, С.І.Кучеренко, Д.І.Мазоренко, Л.М.Тищенко. – Харків, 2009. – 340 с.
3. Заховайко О.П. Теорія механізмів і машин. Курс лекцій для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» / Олександр Панасович Заховайко – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 242 с.
4. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студ. Высш. учеб. заведений / [М.З.Коловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семенов, А.В.Слоущ]. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 560 с.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
6. Справочник по промышленной роботехнике: В 2 кн. Кн.2: Пер. с англ./Под ред. Ш. Нофа. – М.: Машиностроение, 1990. – 480 с.
7. Доронин Ф.А. Кинематика плоского манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы в среде Mathcad. Теория механизмов и машин. Кинематика механизмов. Том 14 2016 №1(29), С. 6-20
8. Востриков В.Н., Романцев А.А. Структурно-параметрический синтез пространственных четырехзвенных шарнирных механизмов. Теория механизмов и машин. Структура механизмов. Том 13, 2015 №2(26). С.33-42
9. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1970. – 560 с.
10. Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы. Справочник. Изд. 4-е, перераб. И доп. Под ред. С.Н.Кожевникова. М., «Машиностроение», 1976. – 784 с.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2017 р.

Стаття прийнята до друку 12.10.2017 р.

Шостачук Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры прикладной механики и компьютерно-интегрированных технологий,
Житомирский государственный технологический университет
г.Житомир, Украина

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР В УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН»

В статье обосновано значение подробного изучения классификации кинематических пар, как одного из основных объектов исследования в теории механизмов и машин. Предложен порядок рассмотрения кинематических пар, который способствует наиболее быстрому усвоению классификации студентами. Классы кинематических пар с числом связей (или разрешенных движений), отличающимся от единицы, целесообразно объяснять при помощи метода обращенного движения. Предложено использовать 3-D модели с приведением примеров использования данных кинематических пар в рабочих машинах.

Ключевые слова: геометрическая модель, кинематическая пара, кинематические связи, механизм, робот.

Shostachuk Andrii

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Department of Applied Mechanics and Computer-Integrated Technologies
Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

GEOMETRICAL MODELS OF KINEMATIC PAIRS IN EDUCATIONAL DISCIPLINE "THEORY OF MECHANISMS AND MACHINES"

The importance of the detailed study of kinematic pair classification is grounded in the article, as the class of a kinematic pair determines the character of links' interaction (on a surface, along the lines or at the points). In addition, the class of a kinematic pair determines the amount and the direction of the unknown reactions at the interaction of two links that influences the character of the power calculation of a mechanism. The order of consideration of kinematic pairs is offered. When the minimal amount of either imposed bonds or allowed relative motions of the links in a kinematic pair facilitates the quickest learning of classification by the students, these pairs are considered first of all. It is reasonable to explain the classes of kinematic pairs with the amount of bonds (or allowed motions) different from one with a help of the reverse motion method. Determination of the class of such kinematic pairs as, for example, "lobe-pusher" and "gearwheel" causes difficulties for students. The essence of application of this method is in giving a rotary motion to both links with some angular rate at which one of the links stops and the other (movable) will produce certain motions in relation to the unmovable one.

Key words: geometrical model, kinematic pair, kinematic bonds, mechanism, robot