

РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ОСЕЙ МЕХАНІЗМІВ РОБОТІВ

Яртемик Є. А.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: yevhenii.yartemyk@nure.ua

Анотація: Виконано оглядовий аналіз існуючих традиційних загальних підходів щодо попереднього проектування деталей машин та механізмів роботів, а також розглянуті питання щодо доцільності впровадження їхнього автоматизованого проектування. Виконано аналіз умов експлуатації осей механізмів роботів та запропонована узагальнена схематизація осі у вигляді двоопорної балки, що згинається у двох взаємно ортогональних площинах, та дозволяє забезпечити зрозуміле введення вихідних даних та автоматизоване визначення реакцій опор осі, що є необхідним для її подальшого проектування. Одержані універсальні вирази для визначення реакцій опор осі, що необхідні для автоматизації її попереднього проектування.

Ключові слова: робот, деталь, вісь, схематизація, автоматизоване проектування

DEVELOPMENT OF THEORETICAL FUNDAMENTALS FOR AUTOMATED DESIGN OF AXLES OF ROBOTS' MECHANISMS

E. Yartemyk

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave.

E-mail: yevhenii.yartemyk@nure.ua

Abstract: A review analysis of the existing approaches for the preliminary design of machines' parts and robots' mechanisms, as well as issues related to the feasibility of their automated design. The analysis of operating conditions of axles of robot mechanisms is performed and the generalized schematization of an axle in the form of a two-support beam which is bent in two mutually orthogonal planes is offered, and allows to provide clear input of initial data and automated definition of reactions of axle supports which is necessary for its further design. Universal expressions are obtained to determine the reactions of the axle required for the automation of preliminary design.

Key words: robot, part, axis, schematization, computer-aided design

ВСТУП. Вісь представляє собою деталь, яка забезпечує обертання інших деталей без передачі крутильного моменту. На осях зазвичай закріплюють шківів та зубчасті колеса, що забезпечують передачу рухів в механізмах роботів. Проектувальні розрахунки осей є відносно нескладними та добре відомими разом із підходами щодо їхнього проектування. Оскільки вісь є досить розповсюдженою деталлю, яка міститься у великій кількості типорозмірів в механізмах роботів, то автоматизоване проектування осей представляє значний інтерес, та потребує створення спеціального програмного забезпечення.

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ. Розв'язок сучасної індустрії пов'язаний, насамперед, із впровадженням робото-технічних систем для максимального виключення ручної праці збільшення ефективності підприємств [1–4]. Поширення використання робото-технічних систем можлива лише за рахунок суттєвого удосконалення їхніх конструкцій, яке сьогодні можна здійснити тільки шляхом автоматизації проектування у тому числі механізмів передач робото-технічних систем. Таким чином, проблема автоматизації проектування механізмів передач є актуальною сьогодні, оскільки її

розв'язування сприятиме подальшому удосконаленню конструкцій та розширенню впровадження робото-технічних систем.

Сучасні розповсюджені спеціалізовані комп'ютерні системи автоматизованого проектування створюються як універсальні та можуть бути застосованими щодо проектування різноманітних технічних систем. Зрозуміло, що використання таких універсальних комп'ютерних систем автоматизованого проектування щодо розв'язування окремих класів задач, які необхідні для деякого окремого підприємства не буде ефективним без їхнього налаштування та пристосування щодо розв'язування необхідних окремих класів задач. Таке налаштування та пристосування універсальних систем автоматизованого проектування щодо розв'язування окремих класів задач здійснюється за рахунок створення спеціалізованого програмного забезпечення, насамперед, у вигляді сценаріїв відпрацювання. Таким чином, загальним трендом щодо розв'язування проблем автоматизованого проектування роботів є розробка вузькоспеціалізованого програмного забезпечення, що має доповнювати існуючі комп'ютерні системи загального призначення. основною складністю створення такого програмного забезпечення є те що воно може вимагати використання окремих компонентів штучного інтелекту, оскільки процес проектування – це процес інтелектуальної діяльності людини. оскільки універсальні системи принципово не можуть передбачити заздалегідь усі можливі варіанти свого подальшого використання, до створення вузько спеціального програмного забезпечення досить важливим щодо розв'язування глобальної проблеми забезпечення автоматизованого проектування механізмів передач робото-технічних систем. Впровадження систем автоматизованого проектування дозволить значно удосконалити конструкції та істотно розширити галузь застосування роботів, та поширити класи операцій, що можуть виконуватися роботами. Зрозуміло, що впровадження систем автоматизованого проектування вимагає розробки вузькоспеціалізованого програмного забезпечення для розв'язування задач, відповідних кожному окремому класу проектованих конструкцій, і саме це робить актуальною тему даної роботи, яка присвячена створенню програмного модуля автоматизованого проектування механізмів передач робото-технічних систем.

Дана робота виконується з метою розробки теоретичних основ для автоматизації первинного проектування осей, які є досить важливими деталями механізмів передач робото-технічних систем; передбачається використання наявного досвіду проектування осей в існуючих проектах.

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. Розміри деталей машин та осей тощо визначаються, насамперед, із умови міцності, яка у загальному випадку має наступний вигляд [5]:

$$\sigma_e \leq [\sigma], \quad (1)$$

де σ_e – еквівалентне напруження, відповідне напруженому стану деталі; $[\sigma]$ – допустиме напруження, яке обирають помітно меншим межі міцності та межі плинності матеріалу деталі щоб забезпечити бажаний запас міцності.

Зрозуміло, що еквівалентне напруження (1) залежатиме від зовнішніх навантажень та розмірів деталі:

$$\sigma_e = \sigma_e(p_1, p_2, \dots; d_1, d_2, \dots), \quad (2)$$

де p_1, p_2, \dots – характеристики зовнішніх навантажень; d_1, d_2, \dots – характерні розміри деталі.

Співвідношення(2) дозволяє представити умову міцності (1) у вигляді

$$\sigma_e(p_1, p_2, \dots; d_1, d_2, \dots) \leq [\sigma]. \quad (3)$$

Умова (3) дозволяє розв'язувати багато інженерних питань, наприклад визначати розміри деталі, при яких задовольняється умова міцності для заданих навантажень та характеристик матеріалу. Зрозуміло, що у загальному випадку маємо множину розмірів, що задовольняють умові міцності, оскільки маємо тільки одну умову (3) для визначення розмірів деталі. Загальний підхід щодо визначення розмірів деталей машин при проектуванні передбачає використання спрощених моделей деформування деталей, що враховують співвідношення їхніх геометричних розмірів. Таким чином, замість множини розмірів d_1, d_2, \dots , що визначають форму деталі, розглядають один характерний розмір d , який саме і визначає спроможність деталі опиратися руйнуванню при дії на неї зовнішніх навантажень. За умов такого спрощення маємо, що загального виду співвідношення (3) набуде більш простішого вигляду:

$$\sigma_e(p_1, p_2, \dots; d) \leq [\sigma]. \quad (4)$$

Із умови (4) маємо можливість визначити розмір деталі:

$$d \geq d(p_1, p_2, \dots; [\sigma]). \quad (5)$$

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ОСЕЙ МЕХАНІЗМІВ РОБОТІВ. Віссю називають деталь, яка призначена тільки для закріплення деталей, що обертаються, але не для передачі обертального моменту [5–7]. На осях механізмів роботів (рис. 1) зазвичай закріплюють шківні пасових передач та зубчасті колеса ланцюгових, зубчастих та черв'ячних передач. Хоча осі є досить розповсюдженими деталями, що використовуються в різних технічних системах, їхня повна стандартизація, як, наприклад, для кріпильних деталей, є неможливою, оскільки конструкція осей певним чином зв'язана із характеристиками та призначенням тих технічних систем, в яких ці осі використовуються; стандартними в конструкції осей є тільки певні елементи радіуси округлень переходів між сходинками різного діаметру, пази під шпонки та інші, а також розміри, що обмежені стандартним рядом. Таким чином, хоча осі є досить розповсюдженими деталями, їхнє проектування кожного разу є певним чином оригінальною задачею. З іншого боку, принципи конструювання осей, що використовуються в різних технічних системах, у тому числі і в механізмах маніпуляторів роботів, є однаковими, та розглядаються, наприклад в роботах [5, 6, 8]. За цих умов є доцільним створення систем автоматизованого проектування осей, як найбільш розповсюджених деталей, що мають однакові принципи проектування; такі системи будуть досить універсальними та завдяки цьому корисними для використання при проектуванні не тільки робото-технічних систем, але і інших технічних систем.

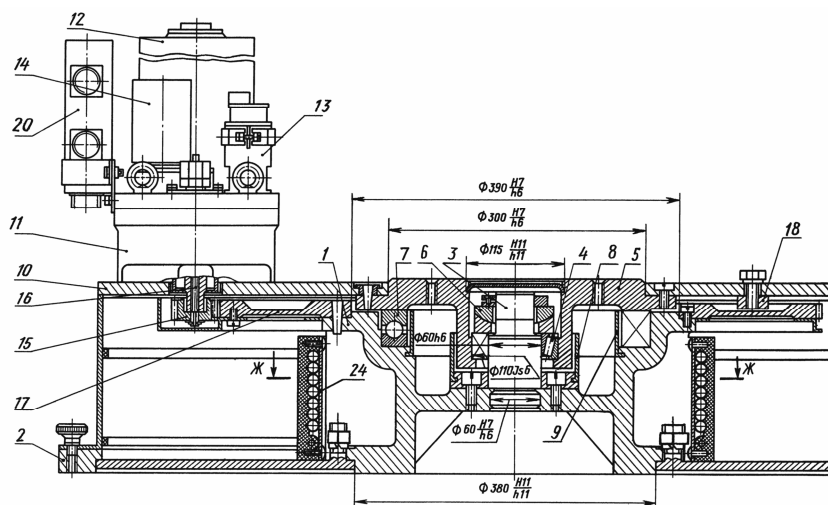


Рисунок 1 – Механізм повороту універсального промислового роботу "УНІВЕРСАЛІ-5" з електроприводом, що наведений в роботі [7]

Проектувальний розрахунок осей виконують для орієнтовного визначення їхнього діаметра із умови статичної міцності [6], тобто у випадку проектування осей характерним розміром d у виразах (4), (5) є діаметр. При виконанні проектувального розрахунку осей враховуються усі активні сили та реакції опор, що одночасно можуть діяти в ортогональних напрямках x та y , і визначають згинаючі моменти M_y та M_x у площинах, відповідних ортогональним напрямкам x та y . Результуючий згинаючий момент M_Σ визначають наступним чином [6]:

$$M_\Sigma = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}. \quad (6)$$

Еквівалентне напруження осі при її згинанні визначають наступним чином:

$$\sigma_e = \frac{M_\Sigma}{W_\Sigma}, \quad (7)$$

де W_Σ – момент опору згинанню перерізу осі в площині дії результуючого згинаючого моменту (6).

Для осей круглого перерізу маємо [5]:

$$W_\Sigma = \frac{\pi d^3}{32}, \quad (8)$$

де d – діаметр осі.

З урахуванням виразів (7), (8) умова міцності (4) набуде вигляду:

$$\frac{32M_\Sigma}{\pi d^3} \leq [\sigma]. \quad (9)$$

Із нерівності (9) отримаємо окремий випадок загальної умови (5) у наступному вигляді:

$$d \geq 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_\Sigma}{[\sigma]}}. \quad (10)$$

Умова (10) є основою проектування осей механізмів роботів [6].

СХЕМАТИЗАЦІЯ ОСІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ. Як свідчить нерівність (10), проектування осі зводиться фактично до визначення результуючого згинаючого моменту. Таке визначення має здійснюватися з урахуванням активних сил та реакцій опор осі, та, зрозуміло має бути складовою частиною систем автоматизованого проектування. Слід зазначити, що задачі щодо визначення згинаючих моментів є досить відомими та відносно нескладними, але автоматизоване розв'язування таких задач потребує певного їхнього узагальнення, що саме й буде розглянуто далі.

При побудові узагальненої схематизації осі для її автоматизованого проектування врахуємо, що осі зазвичай використовують для закріплення на них шківів та зубчастих коліс. Оскільки осі за їхнім визначенням не забезпечують передачі крутного моменту, то, зрозуміло, що на осі не може бути закріплено більше одного шківу або зубчастого колеса. Також цілком зрозуміло, що забезпечення обертання або нерухомого положення осі має здійснюватися не менш ніж двома опорами (підшипниками). Таким чином, у загальному випадку маємо схематизацію осі у вигляді диску діаметром D , що узагальнено представляє шків, або зубчасте колесо, що закріплене на осі, а також дві опори, що утримують нерухомою вісь обертання (рис. 2).

Експлуатаційне навантаження на вісь представляємо у вигляді трьох сил F_t , F_r та F_z , що узагальнено представляють взаємодію шківу із пасом або контактні сили у зубчастому колесі (рис. 2), що закріплені на осі; визначення таких сил є відомим [5, 8] для шківів пасових передач та для зубчастих коліс різного типу та різної конструкції. Осі дослідницької системи координат xuz обираємо таким чином, щоб напрями сил F_r та F_t були протилежними осям x та y , як це показано на рис. 2, а вісь z обираємо таким чином, щоб система координат

xuz була правою; осьова сила F_z при цьому може діяти в будь-якому напрямку уздовж осі z , що враховуватимемо відповідним знаком величини F_z (на рис. 2 показаний випадок $F_z > 0$). При виборі дослідницької системи координат xuz також важливо, щоб точка прикладення сил F_τ , F_r та F_z мала нульові координати y та z і ненульову координату $x = D/2$ (рис. 2). Завдяки введень дослідницькій системі координат (рис. 2) маємо можливість визначити розташування опор (підшипників) осі за допомогою координат z_1 та z_2 , а реакції опор осі – за допомогою сил R_{x1} , R_{y1} та R_{x2} , R_{y2} . Зрозуміло, що розташування опор осі, що показані на рис. 2, відповідають координатам $z_1 > 0$ та $z_2 > 0$, хоча координати опор осі можуть бути від'ємними, у випадку якщо опори розташовані з іншого боку диску, що закріпленій на осі. Реакції опор осі, що показані на рис. 2, відповідають насправді додатним напрямкам відліку реакцій, а дійсний напрям реакцій опор осі буде визначатися знаком величин R_{x1} , R_{y1} та R_{x2} , R_{y2} . Слід підкреслити, що вибір дослідницької системи координат є довільним, а запропонований варіант (рис. 2) обумовлений виключно зручністю визначення реакцій опор осі та зручністю завдання вихідних даних щодо автоматизованого проектування осей.

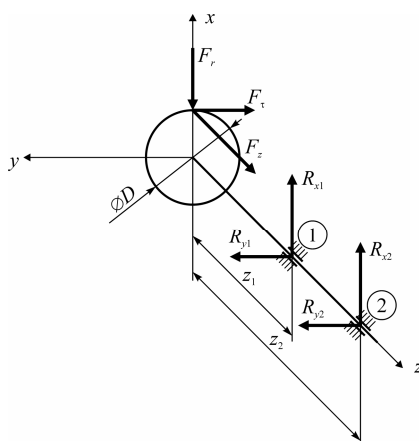


Рисунок 2 – Схематизація осі для автоматизованого визначення реакцій її опор, що є необхідним для автоматизованого проектування

Для визначення реакцій опор осі (рис. 2) маємо дві системи двох лінійних алгебраїчних рівнянь, що одержані із умов рівноваги осі та мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} R_{x1} + R_{x2} = F_r, \\ z_1 R_{x1} + z_2 R_{x2} = DF_z/2, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} R_{y1} + R_{y2} = F_\tau, \\ z_1 R_{y1} + z_2 R_{y2} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь (11) та (12) дозволяє визначити реакції опор осі:

$$R_{x1} = \frac{z_2 F_r - DF_z/2}{z_2 - z_1}, \quad R_{x2} = \frac{DF_z/2 - z_1 F_r}{z_2 - z_1}, \quad (13)$$

$$R_{y1} = \frac{z_2}{z_2 - z_1} F_\tau, \quad R_{y2} = -\frac{z_1}{z_2 - z_1} F_\tau. \quad (14)$$

Таким чином, запропонована узагальнена схематизація осі механізмів роботів (рис. 2) дозволяє забезпечити зрозуміле введення вихідних даних та визначення реакцій опор осі для її автоматизованого проектування.

ВИСНОВКИ. В результаті виконання досліджень одержані досить важливі результати щодо розробки теоретичних основ автоматизації попереднього проектування осей механізмів роботів, що є необхідним для подальшого створення необхідних програмних модулів – складових спеціалізованого програмного забезпечення систем автоматизованого проектування деталей механізмів роботів різного призначення.

Вісь є деталлю, що забезпечує обертальний рух, але при цьому не передає крутного моменту та широко використовується в машинах та механізмах різного призначення у тому числі в механізмах роботів. Слід підкреслити, що механізм роботу може містити досить велику кількість осей різних конструкцій та типорозмірів у залежності від їхнього призначення в даному механізмі. Різноманіття експлуатаційних умов унеможливило стандартизацію осей як у трипільних деталях (болтів, шпильок, гвинтів і т.п.), тому проектування осей для кожного механізму є оригінальною задачею. В той же час, підходи щодо проектування осей різних механізмів та машин є однаковими та добре відомими, тому розв'язування задачі проектування осей містить досить вагому рутинну складову. З урахуванням цього, створення системи автоматизованого проектування осей механізмів роботів є доцільним з практичної точки зору для економії робочого часу інженерів-конструкторів.

Проектування деталей машин та осей механізмів роботів у тому числі зводиться до визначення основних розмірів деталей (осей), що забезпечують виконання умови міцності, яка обмежує внутрішні механічні напруження в деталях. При проектуванні осей враховують згинаючі моменти від зовнішнього навантаження та реакцій опор, які у загальному випадку можуть діяти у двох ортогональних площинах; величина сумарного згинаючого моменту та допустиме напруження конструкційного матеріалу обмежують мінімальний діаметр осі. Зрозуміло, що проектування осі потребує визначення реакцій її опор.

Запропонована узагальнена схематизація осі у вигляді двоопорної балки, що згинається у двох взаємно ортогональних площинах, дозволяє забезпечити зрозуміле введення вихідних даних та автоматизоване визначення реакцій опор осі, що є необхідним для її подальшого проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Romashov Yu., Yartemyk Y. Prikhodko K. Automated Design of Mechanical Structures Used in Robotic Systems with Existed Experience // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2021. 180 с. - р. 24-26.
2. Z. Chong, F. Xie, X.-J. Liu, J. Wang, H. Niu, "Design of the parallel mechanism for a hybrid mobile robot in wind turbine blades polishing", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, 101857, 2020.
3. B. Zhang, J. Wu, L. Wang, Z. Yu, "Accurate dynamic modeling and control parameters design of an industrial hybrid spray-painting robot", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 63, 101923, 2020.
4. F. Bader, S. Rahimifard, "A methodology for the selection of industrial ro-bots in food handling", Innovative Food Science & Emerging Technologies, vol. 64, 102379, 2020.
5. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов вузов / Под ред. В.А. Финогенова. 6-е изд., перераб. Москва: Высш. шк., 2000. 383 с.
6. Детали и механизмы роботов: Основы расчета, конструирования и технологии производства: Учеб. пособие / Р.С. Веселков, Т.Н. Гонтаровская, В.П. Гонтаровский и др.; Под ред. Б.Б. Самотокина. Киев: Выща шк., 1990. 343 с.
7. Промышленные роботы в машиностроении: Альбом схем и чертежей: Учеб. пособие для технических вузов / Ю.М. Соломенцев, К.П. Жуков, Ю.А. Павлов и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. Москва: Машиностроение, 1986. 140 с.
8. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1989. 496 с.

Науковий керівник: Ромашов Юрій Володимирович, д.т.н., професор кафедри КІТАМ Харківський національний університет радіоелектроніки.