

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ РУХУ ВИХІДНОЇ ЛАНКИ МЕХАНІЗМІВ,
ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ МЕХАНІЗМУ ЧЕБИШЕВА З НАБЛИЖЕННЯМ
ВЕРХНЬОЇ ДІЛЯНКИ ШАТУННОЇ КРИВОЇ**

Розглядається питання кінематичного синтезу важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки, що побудовані на основі шарнірного механізму Чебишева, у якого для наближення до дуги кола використовується верхня ділянка шатунної кривої. Проведено дослідження законів руху, що забезпечує вихідна ланка таких механізмів та встановлено, що в багатьох випадках фактичні величини тривалості зупинки вихідної ланки є більшими порівняно з теоретичними величинами за умовами найкращого наближення за Чебишевим. Визначено фактичні значення тривалостей зупинок та побудовано відповідні діаграми, що дозволяють проводити кінематичний синтез таких механізмів.

Ключові слова: кінематичний синтез, механізми Чебишева, кругові напрямні механізми, зупинка вихідної ланки, найкраще наближення за Чебишевим.

V.O. KHARZHEVSKYI
Khmelnitskyi National University

**THE RESEARCH OF MOTION LAWS OF THE OUTPUT LINK OF THE MECHANISMS WHICH ARE BASED ON
CHEBYSHEV'S LINKAGE MECHANISM WITH APPROXIMATION OF THE COUPLER CURVE'S UPPER PART**

The kinematic synthesis of dwell linkage mechanisms on the basis on Chebyshev's linkage with approximation of the coupler curve's upper part to the arc of the circle is considered in the article. The research of the motions laws of the output link of such mechanisms was carried out and it is established that in many cases actual dwell durations of the output link are larger than theoretical ones that was defined using the conditions of the Chebyshev's best approximation. The values of the dwell of the output link were refined, appropriate diagrams are given in the article. The received results allow carrying out kinematic synthesis of such mechanisms.

Keywords: kinematic synthesis, Chebyshev's linkages, circular path generating linkages, dwell of the output link, Chebyshev's best approximation.

В багатьох галузях промисловості широко використовуються циклові технологічні машини-автомати, виконавчі органи яких здійснюють зворотно-поступальний або зворотно-обертовий рух та забезпечують одну або декілька періодичних зупинок вихідної ланки. Для цього можуть використовуватись різні типи механізмів, зокрема кулачкові, важільні, кулачково-важільні, мальтійські та ін. Не дивлячись на те, що кулачкові механізми є універсальними за своїми кінематичними характеристиками та при цьому мають досить прості розроблені методи синтезу, проте порівняно мала зносостійкість кулачків внаслідок наявності вищої кінематичної пари, схильність до розмикання цієї пари в механізмах з великими навантаженнями та частотами обертання, в багатьох випадках робить недоцільним використання таких механізмів на практиці. Тому в сучасних машинах є цілий ряд прикладів використання для цього саме важільних механізмів, які не мають цих недоліків. Як відомо, важільні механізми із зупинкою вихідної ланки можна проектувати на основі базових кругових та прямолінійно-напрямних механізмів, які крім того мають самостійне використання у сучасних машинах. Однак методика синтезу таких механізмів є досить складною та потребує в багатьох випадках використання сучасних аналітично-числових методів.

Відомо [1, 2], що існує два основних напрямки синтезу таких механізмів: методи найкращого наближення функцій за Чебишевим та методи кінематичної геометрії, що започатковані Бурместером та продовжені в роботах Ліхтенхельдта [5], Бейера, Черкудінова [1] та багатьох інших вчених. Алгебраїчні методи Чебишева отримали подальший розвиток в роботах Блоха, Саркіяна, Кіницького [2], Гассманна [15]. Зокрема, в монографії Кіницького [2] розкрито області існування симетричних лямбдоподібних механізмів Чебишева, наведено методику їх синтезу за різними критеріями та результати проведеного кінематичного та кінетостатичного аналізу. В роботі Гассманна [15] розроблено числовий метод синтезу механізмів, що забезпечують найкраще наближення за Чебишевим та мають несиметричну форму шатунної кривої. Використання методів кінематичної геометрії нескінченно близьких положень плоскої фігури для проведення синтезу таких механізмів передбачає пошук у шатунній площині механізмів певних особливих точок, використання яких забезпечує викреслювання шатунних кривих, що на деякій своїй ділянці мають наближення до дуги кола або прямої лінії. Такими особливими точками є, зокрема, точки Болла [8, 9, 11], Бурместера [10], точки розпрямлення 4-го [7] та 5-го порядку [13], а також точки Чебишева (Болла-Бурместера) [12].

В даній роботі розглянемо синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки на основі лямбдоподібного механізму Чебишева, у якого для наближення до дуги кола використовується верхня ділянка шатунної кривої (рис. 1, а). Всі розміри ланок такого механізму є відносними, особливою є те, що за модуль довжини прийнято довжину шатуна AB , при цьому виконується умова $l_{AB} = l_{BC} = l_{BD} = 1$. Синтезу таких механізмів присвячені, зокрема, робота Светловського, Кіницького [6]. Розробці числового методу синтезу таких механізмів була присвячена також робота [4]. В роботі [14] нами було проведено

визначення фактичних тривалостей зупинок у механізмах Чебишева з наближенням нижньої ділянки шатунної кривої.

В результаті проведених досліджень встановлено, що фактична тривалість зупинки в механізмах з наближенням верхньої ділянки шатунної кривої в багатьох випадках також є значно більшою, ніж межі теоретичного наближення за Чебишевим. Тому метою даної роботи є дослідження законів руху таких механізмів та визначення фактичних величин тривалості зупинки з використанням методів числового аналізу.

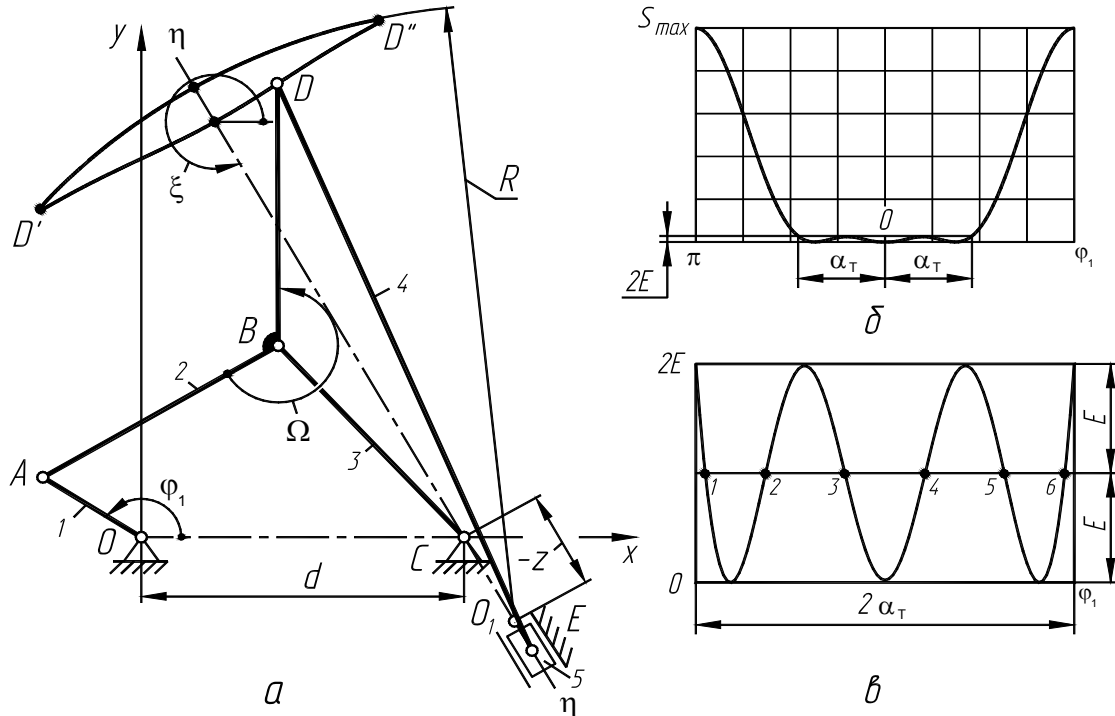


Рис. 1. Важільний механізм із зупинкою вихідної ланки на основі механізму Чебишева $OABCD$, що забезпечує наближення верхньої ділянки шатунної кривої до дуги кола (а); діаграма переміщень вихідної ланки (б); ділянка наближення за умовами найкращого наближення за Чебишевим (в)

Особливістю найкращого наближення за Чебишевим є те, що воно є рівномірним, з максимально можливою кількістю вузлів інтерполяції між шатунною кривою та дугою наближення (рис. 1, в). Для шарнірного чотириланкового механізму таке максимальне число вузлів інтерполяції дорівнює шести, оскільки шатунна крива такого механізму є алгебраїчною трициркулярною кривою шостого порядку, яка за теоремою Кемпе може мати з дугою кола не більше 12 спільних точок, з яких 6 – дійсні.

Механізм, зображений на рис. 1, а працює наступним чином: під час неперервного обертового руху кривошипа 1, шатунна точка D механізму описує шатунну криву, яка на ділянці $D'D''$ наближається до дуги кола радіусом R . Якщо прийняти довжину шатуна BD приєднаної групи 4-5 рівною довжині R , то вихідна ланка 5 механізму буде мати наближену зупинку під час проходження шатунною точкою D інтервалу наближення $D'D''$. Приклад діаграми переміщень вихідної ланки механізму показаний на рис. 1, б. Тривалість зупинки вихідної ланки $2\alpha_T$ визначається як кут φ_1 повороту кривошипа OA , що відповідає періоду зупинки.

Аналіз лямбдоподібних механізмів Чебишева з наближенням верхньої ділянки шатунної кривої показав, що їх шатунні криві, в цілому, є досить однотипними, оскільки механізм є симетричним. Як показано в роботі [6], вони здатні забезпечувати зупинку вихідної ланки в досить широких межах $2\alpha_T = 20...160^\circ$. Проте, як показали проведені нами дослідження, такий діапазон тривалостей зупинок є лише теоретичним та не завжди відповідає фактичним значенням. На рис. 2, 3 показано приклади шатунних кривих механізмів Чебишева з наближенням верхньої ділянки шатунної кривої, а також відповідні діаграми переміщень вихідної ланки. Дослідження механізмів проводились з використанням методів аналізу [3]. Як видно, теоретичні значення тривалості зупинки $2\alpha_T$ збігаються з практичними 2α лише для великих значних зупинок (>100 град.) з більшими відхиленнями $2E$.

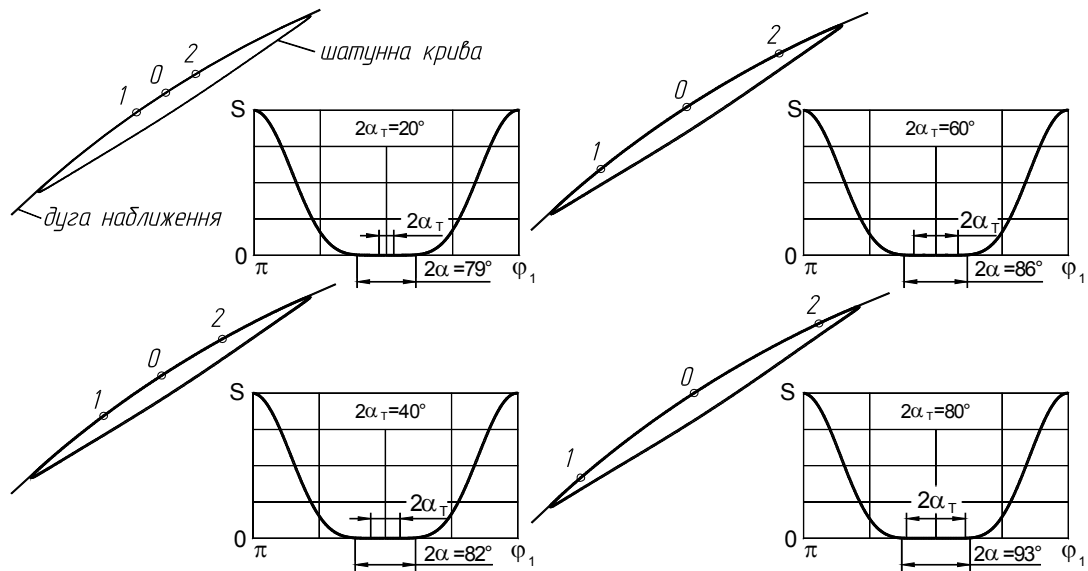


Рис. 2. Приклади шатунних кривих механізмів Чебишева ($\Omega=250^\circ$, $d=1,25$) з наближенням верхньої ділянки до дуги кола та відповідні діаграми переміщень вихідної ланки ($2\alpha_T=20\dots80^\circ$)

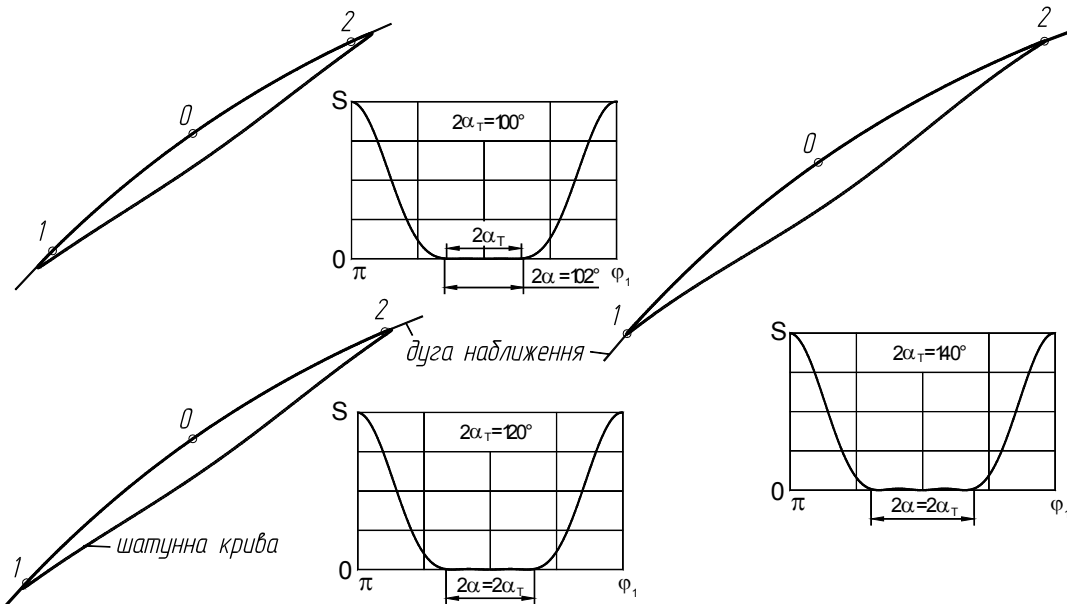


Рис. 3. Приклади шатунних кривих механізмів Чебишева ($\Omega=250^\circ$, $d=1,25$) з наближенням верхньої ділянки до дуги кола та відповідні діаграми переміщень вихідної ланки ($2\alpha_T=100\dots140^\circ$)

На рис. 2, 3 точкою 0 на шатунній кривій позначено положення шатунної точки при $\varphi_1=0$, а точками 1 та 2 – положення, що відповідають крайнім точкам інтервалу чебишевського наближення (відповідно точки D' та D'' на рис. 1, а). Оскільки, як видно з рис. 2, для багатьох механізмів дуга наближення майже ідеально збігається з шатунною кривою за межами теоретичного інтервалу 1-2, виникає задача визначення фактичної тривалості зупинки вихідної ланки таких механізмів. Для цього доцільно застосувати чисельний метод з використанням безрозмірного коефіцієнта граничної швидкості вихідної ланки, що був розроблений нами в роботі [9] та був використаний для визначення фактичного інтервалу наближення у лямбдоподібних механізмах Чебишева з наближенням нижньої частини шатунної кривої [14]. Метод полягає у наступному [14]: за початкову точку при проведенні розрахунків приймаємо $\varphi_1=0$ (на відміну від механізмів з наближенням нижньої частини кривої, де приймалось $\varphi_1=180^\circ$), далі розраховуємо діаграму інваріантів переміщень вихідної ланки, проводимо її диференціювання та визначаємо точки, що відповідають граничній швидкості, величина якої приймалась такою ж, як у роботах [7–14], а саме $[v]=0,022$. В результаті проведених розрахунків визначено фактичні тривалості зупинки вихідної ланки, результати для механізмів з різними кутами злому шатуна Ω показані на рис. 4. Як видно, практично не існує механізмів з тривалістю зупинки $2\alpha_T < 80^\circ$, у яких фактична тривалість зупинки збігалась би з теоретичною, а наприклад для $\Omega=270^\circ$ не існує механізмів з теоретичною тривалістю зупинки $2\alpha_T = 20^\circ$, у яких би фактична тривалість

була би меншою 80° , тобто фактично зупинка вихідної ланки всіх таких механізмів є більшою теоретичної не менш ніж у 4 рази.

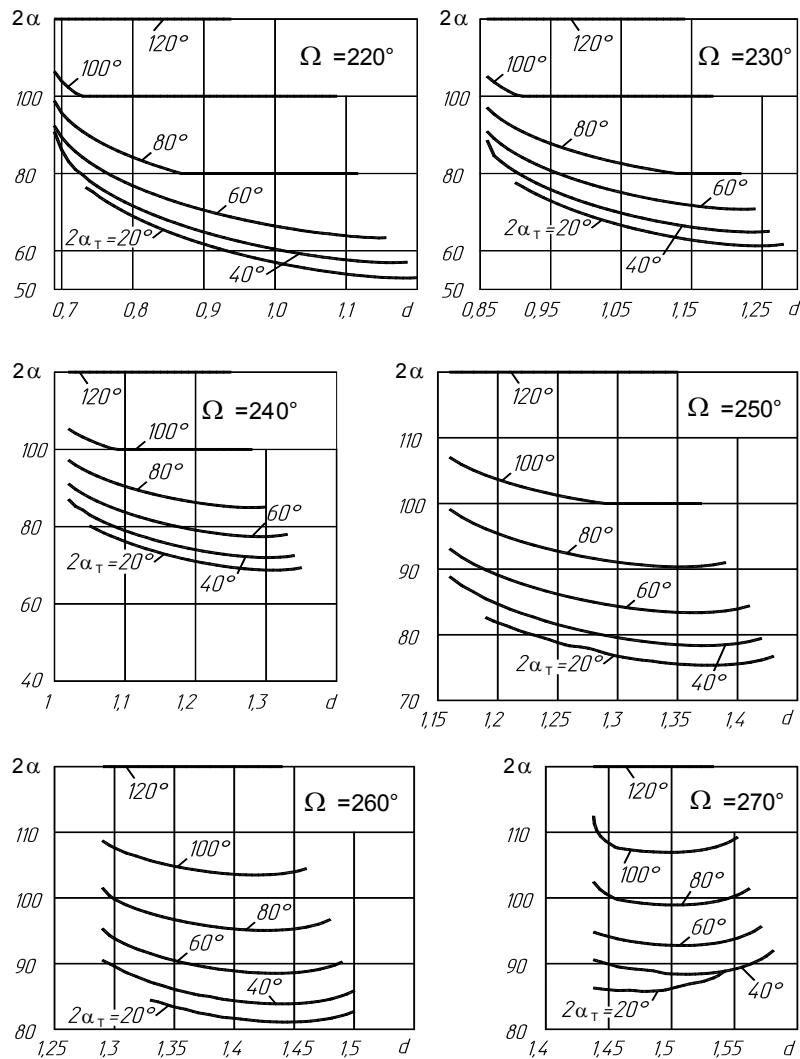


Рис. 4. Діаграми фактичної тривалості зупинки 2α вихідної ланки 5 у механізмах Чебишева, визначені числовим способом (для механізмів, що мають кут злому шатуну $\Omega=220^\circ-270^\circ$ та зупинку теоретичної тривалості $2\alpha_T$)

Очевидно, що максимальне відхилення $2E$ на ділянці найкращого наближення за Чебишевим є найменшим, однак проблема полягає в тому, що зупинка вихідної ланки продовжується за межами теоретичного інтервалу, але з іншою точністю. Приклади діаграм зміни точності наближення для механізмів з $\Omega=250^\circ$ показано на рис. 5.

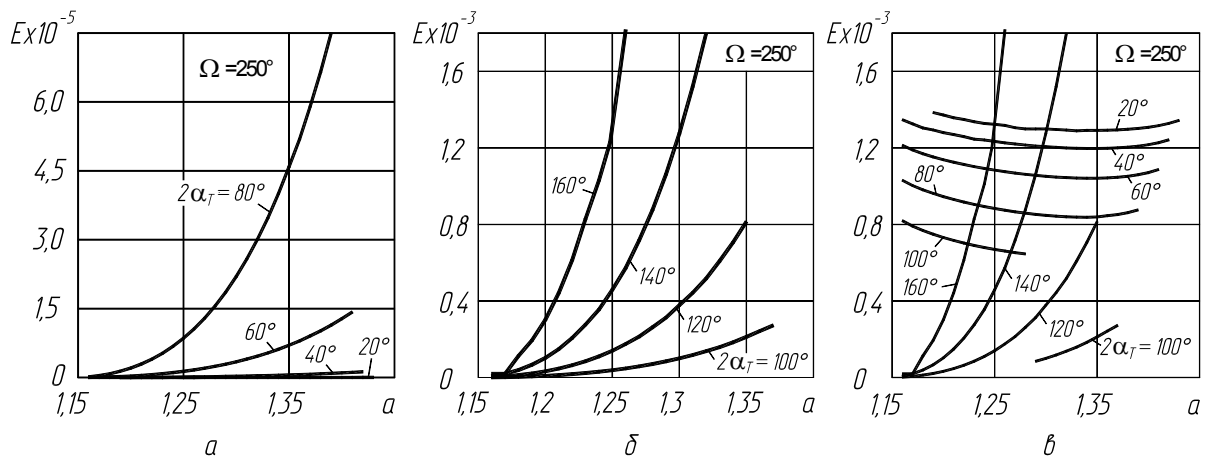


Рис. 5. Діаграми зміни точності наближення: a, δ – теоретичні значення, відповідно до умов найкращого наближення за Чебишевим; v – фактичні значення, отримані числовим способом

Як зазначалось, синтез механізмів Чебишева з наближенням верхньої ділянки шатунної кривої проводився в роботах [4, 6]. Для того, щоби результати, наведені в даній роботі можна було використати практично, нами були побудовані довідкові діаграми, що дозволяють проводити визначення геометричних параметрів таких механізмів – для цього нами були використані методи, наведені у [4, 6]. Приклади отриманих довідкових діаграми показано на рис. 6.

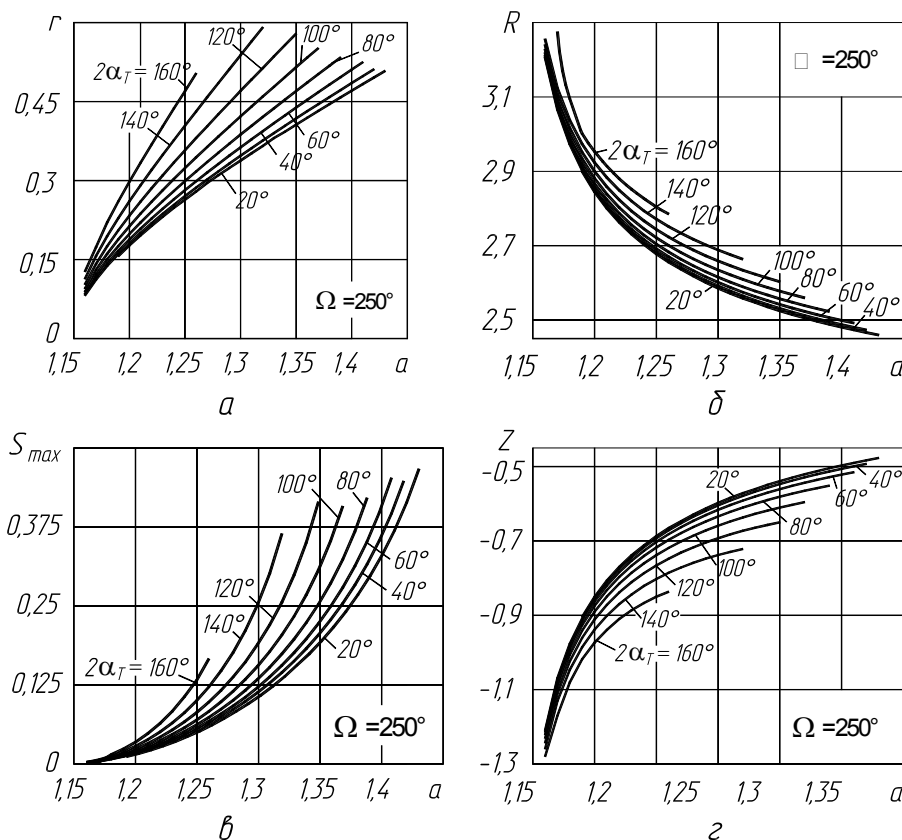


Рис. 6. Діаграми для визначення геометричних параметрів механізмів відповідно до величини теоретичного інтервалу наближення α_T : а) довжина кривошипа $r=l_{OA}$; б) радіус наближеного кола R (довжина шатуна BD); в) максимальний хід вихідної ланки S_{max} ; г) відстань $Z=O_1C$, що визначає положення центру наближеного кола

Крім того, кут ξ нахилу напрямної повзуна 5 приєднаної структурної групи 4-5 можна визначити як $\xi = \pi + \Omega/2$, де Ω – кут злому шатуна ABD базового шарнірного чотириланкового механізму $OABCD$.

Таким чином, в роботі проведено дослідження законів руху вихідної ланки механізмів Чебишева з наближенням верхньої ділянки шатунної кривої, отримані в роботі результати дозволяють визначити фактичні величини інтервалів наближення та тривалості зупинок вихідної ланки механізмів, які в багатьох випадках відрізняються від теоретичних значень. Дослідження планується продовжити в напрямку оптимізаційного синтезу таких механізмів за різними критеріями.

Література

1. Артоболевский И. И. Синтез плоских механизмов / И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский., С. А. Черкудинов. – М. : Физматгиз, 1959. – 1084 с.
2. Киницкий Я.Т. Шарнирные механизмы Чебышева с выстоем выходного звена /Я. Т. Киницкий. – К. : Вища школа, 1990. – 232 с.
3. Киницкий Я.Т. Теория механизмов і машин в системі Mathcad : навч. посібник / Я.Т. Киницкий, В.О. Харжевський, М.В. Марченко. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2014. – 295 с.
4. Киницкий Я.Т. Геометричний синтез симетричних лямбдоподібних механізмів Чебишева чисельним методом / Я.Т. Киницкий, О.Б. Светловський, В.О. Харжевський // Вісник Технол. ун-ту Поділля. – 1999. –№ 6.– С. 160–162.
5. Лихтенхельдт В. Синтез механізмів / В. Лихтенхельдт. – М. : Наука, 1964. – 228 с.
6. Светловський О.Б. Геометричний синтез симетричних лямбдоподібних механізмів Чебишева за заданою тривалістю зупинки вихідної ланки чисельним методом / О.Б. Светловський, Я.Т. Киницкий // Вісник Технол. ун-ту Поділля. – 2001.– № 1. Ч. 1. – С. 20–24.
7. Харжевський В. О. Методика синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів з дотиком 4-го порядку / В.О.Харжевський // Вісник Технологічного ун-ту Поділля. – 2003. – № 6, ч. 1, т. 2. – С. 152–

163.

8. Харжевський В. О. Синтез механізмів із зупинкою вихідної ланки на основі двокривошипного шарнірного чотириланкового механізму // Збірник наукових праць. – Хмельницький : НАДПСУ. – 2004. – № 28, ч. 1 (спец. випуск). – С. 123–125.

9. Харжевський В. О. Синтез важільних прямолінійно-напрямних механізмів та механізмів із зупинкою вихідної ланки на базі шарнірного чотириланкового механізму : дис ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Харжевський В'ячеслав Олександрович. – Хмельницький, 2004. – 262 с.

10. Харжевський В.О. Аналітично-числовий синтез кругових напрямних механізмів на базі шарнірного чотириланкового механізму з використанням точок Бурместера / В. О. Харжевський, Я. Т. Кіницький // *Машинознавство*. – 2005. – № 4. – С. 26–31.

11. Харжевський В.О. Синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки методами кінематичної геометрії : монографія / В.О. Харжевський. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2015. – 223 с.

12. Харжевський В.О. Методика визначення особливих точок Чебишева для синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів / В.О. Харжевський // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2015. – № 3 (225). – С. 34–41.

13. Харжевський В.О. Метод синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів з використанням точок розпрямлення 5-го порядку / В.О. Харжевський // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2015. – № 5(229). – С. 62–67.

14. Харжевський В.О. Визначення фактичної тривалості зупинки вихідної ланки у важільних механізмах, синтезованих за умовами найкращого наближення за Чебишевим / В.О. Харжевський, Я.Т. Кіницький // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2016. – № 6 (243). – С. 7–12.

15. Gassmann V. Synthese von Geradföhrungen mit ebenen Viereckgetrieben, Hamburg, Universität der Bundeswehr Diss., 2000. – 102 p.

Рецензія/Peer review : 5.1.2017 р. Надрукована/Printed :1.2.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кіницький Я.Т.