

УДК 621.833.6-597.5

doi: 10.32620/aktf.2022.4.02

Т. В. ГЕРЕШ, С. М. КАВЕЦЬКИЙ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського**«Харківський авіаційний університет», Харків, Україна**Національний технічний університет**«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна*

## СИНТЕЗ ПЛАНЕТАРНИХ МЕХАНІЗМІВ ТИПУ АІ З ВРАХУВАННЯМ КУТІВ ЗАЧЕПЛЕННЯ ДЛЯ ЗВ'ЯЗАНИХ ТА НЕЗВ'ЯЗАНИХ КОЛІС

*Предметом* вивчення в статті є процеси синтезу планетарних зубчастих механізмів типу АІ з незв'язаними та зв'язаними колесами для вирішення завдань проектування зубчастих коліс. *Метою* є розробка синтезу планетарних механізмів типу АІ з врахуванням можливих значень кутів зачеплення і з наперед заданими якісними показниками пар зубчастих коліс на етапі проектування. *Завдання:* розробити методiku синтезу планетарного механізму типу АІ, знайти генеральні рівняння з урахуванням залежності чисел зубців від кутів зачеплення для механізмів цього типу з незв'язаними та зв'язаними колесами з додатковими параметрами синтезу, які б давали змогу виконати синтез планетарного механізму таким чином, щоб гарантовано задовольнити потрібні кути зачеплення зубчастих коліс. Використовуваними *методами* є: методи розв'язання системи лінійних параметричних рівнянь, яка отримана за допомогою генеральних рівнянь синтезу планетарних механізмів. Отримані такі *результати*. Були отримані генеральні рівняння для механізму типу АІ, що враховують параметри геометричного розрахунку зубчастих пар що входять до складу механізму. Проведено дослідження отриманих генеральних рівнянь та побудована область існування планетарних механізмів типу АІ для різних кутів зачеплення пар зв'язаних та незв'язаних коліс. З результатів синтезу видно, що область існування планетарних механізмів значно розширюється, що дає змогу реалізувати ширші границі передавального відношення для кожного числа сателітів та отримати додаткові числа зубців планетарного механізму, які неможливо знайти за допомогою класичних методів. *Висновки.* Наукова новизна отриманих в статті результатів полягає в наступному: розглянутий підхід синтезу з врахуванням кутів зачеплення дає змогу не тільки отримати додаткові комбінації чисел зубців зубчастих коліс планетарного механізму, а ще й в подальших розрахунках спільно використовувати існуючі блокуючі контури для кожної з пар коліс та наперед оцінити можливість нарізання зубчастих коліс, кути зачеплення яких будуть задовольняти обраному параметру на етапі синтезу планетарного механізму.

*Ключові слова:* зубчасті колеса; кут зачеплення; генеральні рівняння; сателіт; передавальне відношення; планетарний механізм; зв'язані колеса; незв'язані колеса; синтез планетарного механізму.

### Вступ

Планетарні механізми мають значні переваги перед рядними або кратними механізмами. Їх активно використовують в машинобудуванні, в приладобудуванні. Планетарні механізми входять до складу редукторів, які знайшли широке застосування в авіації [1] і в двигунах [2 - 4].

Планетарні механізми є порівняно недавнім винаходом. Першим планетарним механізмом був механізм АА із двома зовнішніми зачепленнями, який був винайдений в 1791 році.

До складу планетарного механізму входять шестерні, які почали розробляти ще в давнину, також продовжують цим займатися і в наш час [5].

При проектуванні планетарних механізмів на всіх етапах повинні виконуватися ряд вимог до виробу: надійність, міцність, працездатність, швидкодія, зносостійкість, високий коефіцієнт корисної дії і

т.п. Однак, ці вимоги часто суперечать один одному, тому **практичним завданням** при рішенні цієї проблеми є знаходження оптимального рішення для кожного випадку окремо. Це рішення зводиться до оптимального синтезу (підбору) чисел зубців коліс [6 - 8]. Також важливе значення має вибір коефіцієнтів зміщення ріжучого інструменту. При цьому слід враховувати той факт, що коефіцієнти зміщення впливають на значення кута передачі та якісних показників кожної зубчастої пари. Тому, при виборі коефіцієнтів зміщення ріжучого інструменту, велике значення має залежність кутів передачі в різних ступенях проектного планетарного механізму.

При проектуванні планетарних механізмів разом з синтезом враховують геометрію [9, 10] і кінематику зубчастої передачі [11, 12].

Для планетарних механізмів зубчасті колеса першого, другого та наступних ступенів можуть утворювати:

1) зв'язані колеса (присутні сателіти, що входять у зачеплення з кількома колесами одночасно);

2) незв'язані колеса (відсутні сателіти, що входять у зачеплення з кількома колесами одночасно).

При цьому використовувати відомі блокуючі контури можна спільно для пар зубчастих коліс різних ступенів, якщо відома залежність кутів передачі різних ступенів для зв'язаних і незв'язаних коліс.

В даній роботі розглядаються схеми планетарних механізмів АІ та  $\overline{АІ}$  (рис. 1, 2), які також знайшли широку область застосування у машинобудуванні у складі різноманітних механічних пристроїв.

У зв'язку з використанням даних схем виникає **актуальна задача** про можливість виготовлення планетарних механізмів з наперед заданим передавальним відношенням і про його можливі значення.

## 1. Постановка задачі

**Метою** досліджень в даній статті є задача розробки синтезу планетарних механізмів АІ і  $\overline{АІ}$  з незв'язаними та зв'язаними колесами з врахуванням можливих значень кутів зачеплення і з наперед заданими якісними показниками пар зубчастих коліс, які входять до його складу. При цьому слід зазначити, що метод синтезу [13, 14], який використовують традиційно, не гарантує реалізації заданих якісних показників на етапі виготовлення.

Методика проведення синтезу планетарних механізмів з використанням генеральних рівнянь, які не враховують параметри що не відносяться до якісних показників, приведе до наступної послідовності:

1) використовуючи генеральні рівняння, знаходимо числа зубців планетарного механізму для заданого передавального відношення та числа сателітів;

2) обираємо комбінацію чисел зубців з можливих (отриманих у п. 1);

3) для обраних пар зубчастих коліс обираємо коефіцієнти зміщення ріжучого інструменту;

4) проводимо геометричний розрахунок пар зубчастих коліс та оцінюємо якісні показники.

Така методика проведення синтезу планетарного механізму має наступні недоліки:

1) так як у схемах планетарних механізмів АІ та  $\overline{АІ}$  присутні пари зубчастих коліс зі зв'язаними і незв'язаними зубчастими колесами, тоді вибір коефіцієнтів зміщення ріжучого інструменту для пар зубчастих коліс не є довільним, що значно обмежує область блокуючого контуру;

2) при визначенні якісних показників не виключено, що їх значення будуть незадовільні для пар коліс і відповідно для всього механізму;

3) у випадку отримання незадовільних якісних показників для пар зубчастих коліс слід виконати

корегування параметрів синтезу та провести розрахунок заново;

4) відсутні рекомендації для вибору геометричних параметрів синтезу, що може призвести до безглузких розрахунків у випадку якщо рішення немає.

Тому необхідно розробити методику проведення синтезу з врахуванням параметрів, які здійснюють вплив на обрання коефіцієнтів зміщення при виготовленні зубчастих коліс.

## 2. Рішення задачі

Як відомо, для працездатності планетарного механізму необхідно виконання наступних умов: співвісності, збірки, передавального відношення та сусідства. Для схем АІ та  $\overline{АІ}$  планетарних механізмів умова передавального відношення та збірки мають вигляд [13]:

– умова збірки для схеми АІ

$$\frac{Z_1}{k} \left( 1 + \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3} \right) - \frac{Z_2}{Z_3} Q = P, \quad (1)$$

– умова збірки для схеми  $\overline{АІ}$

$$\frac{Z_1 + Z_3}{k} = N, \quad (2)$$

– передавальне відношення для схеми АІ

$$i_{1H}^{(4)} = 1 + \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3}, \quad (3)$$

– передавальне відношення для схеми  $\overline{АІ}$

$$i_{1H}^{(3)} = 1 + \frac{Z_3}{Z_1}, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість сателітів,

$Q, P, N$  – довільні цілі числа.

Умову співвісності в загальному вигляді з врахуванням кутів зачеплення пар зубчастих коліс запишемо у вигляді [15]:

– для схеми АІ

$$\lambda \frac{Z_1 + Z_2}{Z_4 - Z_3} = t, \quad (5)$$

– для схеми  $\overline{АІ}$

$$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_3 - Z_2} = t, \quad (6)$$

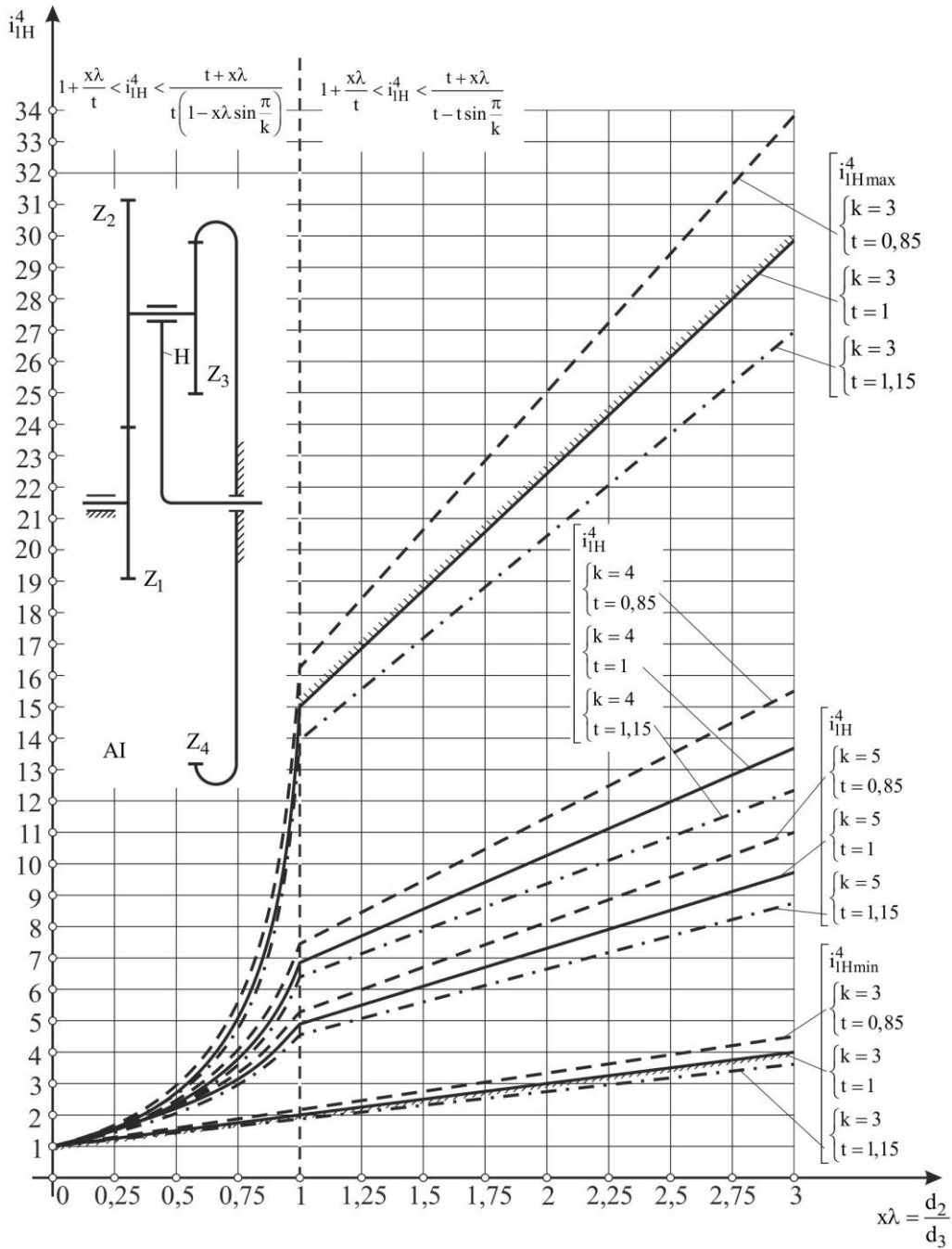


Рис. 1. Область існування механізму AI

де  $\lambda = \frac{m_{12}}{m_{34}}$  – відношення модулів пар зубчастих коліс планетарного механізму AI,

$$t = \frac{\cos(\alpha_{w34})}{\cos(\alpha_{w12})} \text{ для схеми AI та } t = \frac{\cos(\alpha_{w23})}{\cos(\alpha_{w12})}$$

для схеми  $\overline{\text{AI}}$  – відношення косинусів кутів зачеплення пар зубчастих коліс планетарних механізмів AI та  $\overline{\text{AI}}$ .

З урахуванням параметра  $x = \frac{Z_2}{Z_3}$ , який визначає відношення чисел зубців сателітів для схеми

AI, та виразів (1) і (3) отримують генеральні рівняння для чисел зубців зубчастих коліс  $Z_1, Z_3$  і  $Z_4$  [9]:

$$\begin{cases} Z_1 = k \frac{P+xQ}{i_{IH}^{(4)}}, \\ Z_3 = \frac{Z_2}{x}, \\ Z_4 = Z_1 \frac{i_{IH}^{(4)} - 1}{x}. \end{cases} \quad (7)$$

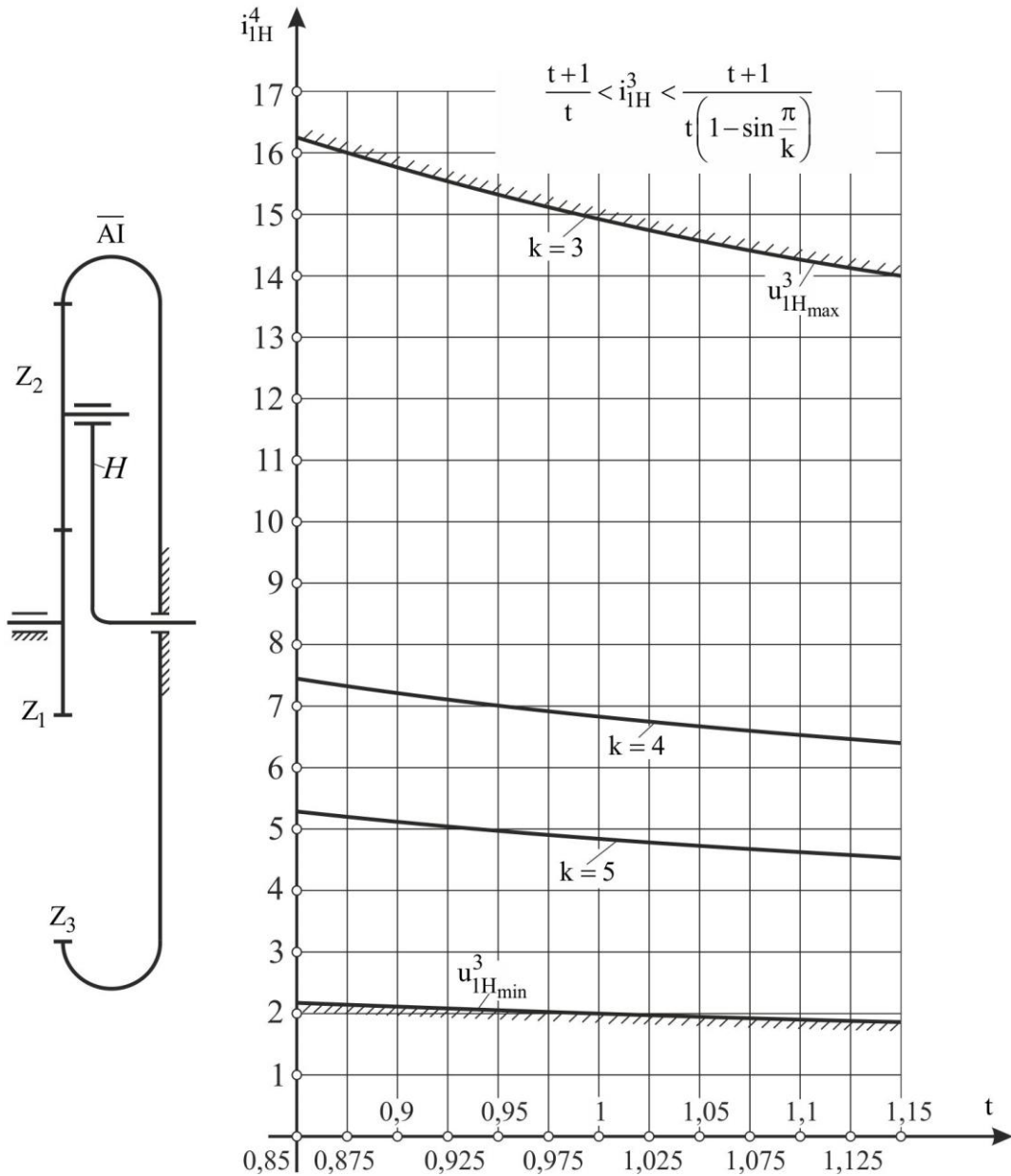


Рис. 2. Область існування механізму  $\overline{AI}$

Використовуючи умову співвісності (5), знаходимо нове генеральне рівняння для визначення числа зубців  $Z_2$  для схеми  $\overline{AI}$ :

$$\begin{aligned} \lambda \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \frac{i_{1H}^{(4)} - 1}{x} - \frac{Z_2}{x}} &= t; \\ \Downarrow \\ \lambda(Z_1 + Z_2) &= t \cdot \left( Z_1 \frac{i_{1H}^{(4)} - 1}{x} - \frac{Z_2}{x} \right); \\ \Downarrow \\ Z_2 &= Z_1 \cdot \frac{t \cdot i_{1H}^{(4)} - t - \lambda \cdot x}{\lambda \cdot x + t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для механізму за схемою  $\overline{AI}$  з виразів (2) і (4) отримують генеральні рівняння для чисел зубців зубчастих коліс  $Z_1$  і  $Z_3$  [1]:

$$\begin{cases} Z_1 = k \frac{N}{i_{1H}^{(3)}}, \\ Z_3 = Z_1 \cdot (i_{1H}^{(3)} - 1). \end{cases} \quad (9)$$

Використовуючи умову співвісності (6), знаходимо нове генеральне рівняння для визначення числа зубців  $Z_2$  для схеми  $\overline{AI}$ :

$$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot (i_{IH}^{(3)} - 1) - Z_2} = t;$$

$$\Downarrow$$

$$Z_1 + Z_2 = t \cdot (Z_1 \cdot (i_{IH}^{(3)} - 1) - Z_2);$$

$$\Downarrow$$

$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{t \cdot i_{IH}^{(3)} - t - 1}{t + 1}. \quad (10)$$

Параметр  $t$  можна приймати в межах  $[0, 8 \dots 1, 2]$ . В цьому випадку кут зачеплення першої пари зубчастих коліс буде змінюватися в межах  $[20^\circ \dots 44^\circ]$ , а для другої пари зубчастих коліс в межах  $[40^\circ \dots 20^\circ]$  [15].

Розглянемо, як зміниться система нерівностей які визначають область існування планетарних механізмів AI та AĪ.

З рівнянь (7), (8) і (9), (10) можна зробити висновки, що генеральні рівняння мають сенс, якщо виконані умови:

– схема AI

$$\begin{cases} i_{IH}^{(4)} - 1 > 0, \\ t \cdot i_{IH}^{(4)} - t - x \cdot \lambda > 0; \end{cases} \quad (11)$$

– схема AĪ

$$\begin{cases} i_{IH}^{(3)} - 1 > 0, \\ t \cdot i_{IH}^{(3)} - t - 1 > 0. \end{cases} \quad (12)$$

З нерівностей (11) та (12) знаходимо умову для передавального відношення  $i_{IH}^{(4)}$  і  $i_{IH}^{(3)}$ :

– схема AI

$$i_{IH}^{(4)} > 1 + \frac{x \cdot \lambda}{t}, \quad (13)$$

– схема AĪ

$$i_{IH}^{(3)} > 1 + \frac{1}{t}. \quad (14)$$

Визначимо другу обмежувальну умову для передавального відношення  $i_{IH}^{(4)}$  і  $i_{IH}^{(3)}$ :

– схема AI

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_2) \sin \frac{\pi}{k} \geq Z_2 + 2, \text{ для } x\lambda > 1, \\ \lambda(Z_1 + Z_2) \sin \frac{\pi}{k} \geq Z_3 + 2, \text{ для } x\lambda < 1. \end{cases} \quad (15)$$

– схема AĪ

$$(Z_1 + Z_2) \sin \frac{\pi}{k} \geq Z_2 + 2. \quad (16)$$

Використовуючи умови співвідності для максимального числа зубців  $Z_4$  і  $Z_3$  при  $x \cdot \lambda > 1$  і  $x \cdot \lambda < 1$  і здійснюючи граничний перехід [11], отримаємо:

– схема AI

$$\begin{cases} i_{IH}^{(4)} < \frac{t + x \cdot \lambda}{t - t \cdot \sin \frac{\pi}{k}} \text{ для } x\lambda > 1, \\ i_{IH}^{(4)} < \frac{t + x \cdot \lambda}{t \left( 1 - x \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\pi}{k} \right)} \text{ для } x\lambda < 1; \end{cases} \quad (17)$$

– схема AĪ

$$i_{IH}^{(3)} < \frac{t + 1}{t - t \cdot \sin \frac{\pi}{k}}. \quad (18)$$

Отримані нерівності (17), (18) дають можливість для кожного вибору параметрів  $x \cdot \lambda$  і  $t$  визначити межі можливого передавального відношення механізмів при виконанні синтезу. Нерівності, які визначають межі передавального відношення, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Нерівності, які визначають область існування планетарних механізмів AI і AĪ

Схема механізму	Нерівність, яка визначає безумовну область існування
AI	$\begin{aligned} &x \cdot \lambda > 1 \\ &1 + \frac{x \cdot \lambda}{t} < i_{IH}^{(4)} < \frac{t + x \cdot \lambda}{t - t \cdot \sin \frac{\pi}{k}} \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &x \cdot \lambda < 1 \\ &1 + \frac{x \cdot \lambda}{t} < i_{IH}^{(4)} < \frac{t + x \cdot \lambda}{t \left( 1 - x \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\pi}{k} \right)} \end{aligned}$
AĪ	$\frac{t + 1}{t} < i_{IH}^{(3)} < \frac{t + 1}{t \left( 1 - \sin \frac{\pi}{k} \right)}$

### 3. Отримані результати

1. Отримані генеральні рівняння для синтезу планетарних механізмів АІ і  $\overline{\text{АІ}}$  з урахуванням корегування кутів зачеплення для пар зв'язаних і незв'язаних зубчастих коліс на етапі синтезу механізму.

2. Отримані умови для визначення меж можливих передавальних відношень для кожного вибору параметрів  $x \cdot \lambda$  і  $t$ .

### Висновки

1. Синтез планетарних механізмів для схем АІ і  $\overline{\text{АІ}}$ , проведений з врахуванням кутів зачеплення, дає змогу отримати додаткові комбінації чисел зубців зубчастих коліс, які неможливо отримати за допомогою генеральних рівнянь наведених в [9].

2. Побудована область існування планетарних механізмів АІ і  $\overline{\text{АІ}}$  (див. рис. 1, 2) дає можливість оцінити межі передавального відношення в залежності від вибору параметрів синтезу або обрати їх значення.

В межах подальшої роботи планується дослідження впливу якісних показників на етапі синтезу планетарних механізмів схем АІ та  $\overline{\text{АІ}}$ . Також планується розробити методику синтезу в поєднанні з існуючими блокуючими контурами для пар зубчастих коліс цих же схем і визначити ізольовані параметри синтезу на блокуючих контурах.

### Література

1. Порівняльна оцінка модифікацій літаків транспортної категорії за частковими та інтегральними показниками ефективності [Текст] / А. З. Двейрін, В. І. Рябков, Л. В. Капітонова, К. В. Майорова // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 3. – С. 4–12. DOI: 10.32620/aktt.2021.3.01.

2. Kislov, O. *Changing patterns of the optimal composition and parameters of propulsions with ramjet ducts from the supersonic cruising flight speed* [Text] / O. Kislov, M. Shevchenko // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 3. – С. 45-55. DOI: 10.32620/aktt.2022.3.05.

3. Вибір та обґрунтування схеми наддуву дизеля авіаційного призначення [Текст] / А. О. Прохоренко, С. С. Кравченко, О. В. Грицюк, А. П. Кузьменко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 1. – С. 75–83. DOI: 10.32620/aktt.2021.1.08.

4. Тимошевський, Б. Г. Аналіз конструкції та технології виготовлення перспективних роторно-поршневих двигунів [Текст] / Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Прокурін // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. –

2020. – № 4. – С. 28–37. DOI: 10.32620/aktt.2020.4.04.

5. Radzevich, S. P. *A Brief Overview of the Evolution of the Scientific Theory of Gearing* [Text] / S. P. Radzevich // *Recent Advances in Gearing*. – 2022. – P. 233-291. DOI: 10.1007/978-3-030-64638-7\_6.

6. Абрамов, В. Т. Синтез планетарних механізмів з парними сателітами мінімальної маси [Текст] / В. Т. Абрамов, О. Ю. Довгополая // *Системи обробки інформації*. – 2002. – Вип. 1. – С. 76-84.

7. Mallik, Asok Kumar. *Kinematic analysis and synthesis of mechanisms* [Text] / Asok Kumar Mallik, Amitabha Ghosh, Günter Ditrach. – CRC Press, 1994. – 688 p. DOI: 10.1201/9780429327278.

8. *The Structure and Optimal Gear Tooth Profile Design of Two-Speed Transmission for Electric Vehicles* [Text] / J. O. Han, et al. // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, iss. 13. – Article No. 3736. DOI: 10.3390/en14133736.

9. Radzevich, S. P. *Interaction of Gear Teeth: Contact Geometry of Interacting Gear and Pinion Teeth Flanks* [Text] / S. P. Radzevich. – *Advances in Gear Design and Manufacture*, CRC Press, 2019. – P. 121-150.

10. Litvin, Faydor L. *Gear geometry and applied theory* [Text] / Faydor L. Litvin, Fuentes Alfonso. – Cambridge university press, 2004. – 818 p.

11. Radzevich, S. P. *Theory of gearing: kinematics, geometry, and synthesis* [Text] / S. P. Radzevich. – CRC Press, 2018. – 934 p.

12. Radzevich, S. P. *On the kinematics and tooth flank geometry of Spr-gearing* [Text] / S. P. Radzevich // *Machines. Technologies. Materials*. – 2020. – Vol. 14, Iss. 4. – P. 142-153.

13. Ткаченко, В. А. Планетарні механізми (оптимальне проектування) [Текст] / В. А. Ткаченко. – Х. : Видавничий центр ХАІ, 2003. – 446 с.

14. Матусевич, В. А. Параметрична оптимізація за критерієм об'єму двухступінчатого планетарного механізму типу АІ-II [Текст] / В. А. Матусевич, Ю. В. Шарабан, О. В. Шехов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 7. – С. 92-102. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.13.

15. Кавецький, С. М. Залежність кутів зачеплення зубчастих пар планетарних механізмів зі зв'язаними та незв'язаними колесами [Текст] / С. М. Кавецький, Т. В. Гереш // *Вісник НТУ „ХПІ”*, Тем. вип. "Машинобудування і САПР". – 2008. – № 2. – С. 115-120.

### References (BSI)

1. Dveyrin, A. Z., Ryabkov, L. V., Kapitonova, L. V., Mayorova, K. V. *Porivnyal'na otsinka modyfikatsiy litakiv transportnoyi katehoriyi za chastkovymy ta intehral'nymy pokaznykamy efektyvnosti* [Comparative

evaluation of the transport category aircraft modifications on private and integral efficiency indicators]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 3, pp. 4–12. DOI: 10.32620/akt.2021.3.01.

2. Kislov, O., Shevchenko, M. Changing patterns of the optimal composition and parameters of propulsions with ramjet ducts from the supersonic cruising flight speed. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 3, pp. 45–55. DOI: 10.32620/akt.2022.3.05.

3. Prokhorenko, A. O., Kravchenko, S. S., Hrytsyuk, O. V., Kuz'menko, A. P. Vybir ta obhruntuvannya skhemy nadduvu dyzelya aviatsiynoho pryznachennya [Selection and justification of aircraft diesel boost system scheme]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 1, pp. 75–83. DOI: 10.32620/akt.2021.1.08.

4. Tymoshevs'kyy, B. H., Mytrofanov, O. S., Poznans'kyy, A. S., Proskurin, A. Y. Analiz konstruktsiyi ta tekhnolohiyi vyhotovlennya perspektyvnykh rotornoporshnevnykh dvyhuniv [Analysis of the design and technologies of manufacturing the perspective rotary-piston engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 4, pp. 28–37. DOI: 10.32620/akt.2020.4.04.

5. Radzevich, S. P. A Brief Overview of the Evolution of the Scientific Theory of Gearing. *Recent Advances in Gearing*. 2022, pp. 233–291. DOI: 10.1007/978-3-030-64638-7\_6.

6. Abramov, V. T., Dovhopolaya, O. Y. Syntez planetarnykh mekhanizmiv z parnymy satelitamy minimal'noyi masy [Synthesis of planetary mechanisms with paired satellites of minimum mass]. *Systemy obrobky informatsiyi*, 2002, vol. 1, pp. 76–84.

7. Mallik, Asok Kumar., Ghosh, Amitabha., Ditrach, Günter. *Kinematic analysis and synthesis of mechanisms*, CRC Press, 1994. 688 p. DOI: 10.1201/9780429327278.

8. Han, Jae-Oh, et al. The Structure and Optimal Gear Tooth Profile Design of Two-Speed Transmission for Electric Vehicles. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 13, article no. 3736. DOI: 10.3390/en14133736.

9. Radzevich, S. P. *Interaction of Gear Teeth: Contact Geometry of Interacting Gear and Pinion Teeth Flanks*. Advances in Gear Design and Manufacture, CRC Press Publ., 2019. pp. 121–150.

10. Litvin, Faydor L., Fuentes, Alfonso. *Gear geometry and applied theory*. Cambridge university press Publ., 2004. 818 p.

11. Radzevich, S. P. *Theory of gearing: kinematics, geometry, and synthesis*. CRC Press Publ., 2018. 934 p.

12. Radzevich, S. P. On the kinematics and tooth flank geometry of Spr–gearing. *Machines. Technologies. Materials*, 2020, vol. 14, iss. 4, pp. 142–153.

13. Tkachenko, V. A. *Planetarni mekhanizmy (optymal'ne proektuvannya)* [Planetary gears (optimal design)]. Kharkiv, Kharkiv Aviation Institute Publishing Center, 2003. 446 p.

14. Matushevych, V. A., Sharaban Y. V., Shekhov, O. V., Parametrychna optymizatsiya za kryteriyem ob'yemu dvukhstupinchatoho planetarnoho mekhanizmu typu AI-II [Parametric optimization by volume criterion of two-stage planetary mechanism of type AI-II]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 7, pp. 92–102. DOI: 10.32620/akt.2019.7.13.

15. Kavets'kyy, S. M., Heresh, T. V. Zalezhnist' kutiv zacheplennya zubchastykh par planetarnykh mekhanizmiv zi zv'yazanymy ta nezv'yazanymy kolesamy [Dependence of gearing angles of gear pairs of planetary mechanisms with coupled and uncoupled wheels]. *Visnyk NTU „KhPI”*, Bulletin of National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute”. Tem. vol. "Mechanical engineering and SAPR", 2008, no. 2, pp. 115–120.

Надійшла до редакції 12.04.2022, розглянута на редколегії 27.07.2022

## SYNTHESIS OF PLANETARY MECHANISMS AI TYPE WITH REGARD TO ENGAGEMENT ANGLES FOR COUPLED AND UNCOUPLED WHEELS

*Tatiana Heresh, Sergey Kavetsky*

The **subject matter** of this article is the processes of synthesis of planetary gear mechanisms of AI type with uncoupled and coupled wheels to solve the problems of gear wheel design. The **goal** is to develop the synthesis of planetary mechanisms of AI type, considering the possible values of engagement angles and with predetermined quality indicators of gear pairs at the stage of design. The **tasks** are to develop a methodology of planetary mechanism synthesis of type AI, to find general equations, considering the dependence of the number of teeth on the engagement angles for mechanisms of this type with uncoupled and coupled wheels with additional synthesis parameters, which would give the possibility of performing the synthesis of the planetary mechanism to guarantee the necessary engagement angles of the cogwheels. The **methods** used are ones for solving the system of linear parametric

equations, which is obtained from the general equations of the synthesis of planetary mechanisms. The following results were obtained: the general equations for the mechanism of type AI, which consider the parameters of the geometrical calculation of the gear pairs that make up the mechanism have been obtained. The research on received general equations has been carried out and the area of existence of planetary mechanisms of AI type for different engagement angles of pairs of coupled and uncoupled wheels has been constructed. From the **results** of synthesis, it can be seen that the range of existence of planetary mechanisms is significantly expanded, which makes it possible to realize a wider range of transmission ratio for each number of satellites and get additional numbers of teeth of the planetary mechanism, which cannot be found using the classical methods. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained in the study consists of the following: the considered approach of synthesis with an account of engagement angles makes it possible not only to obtain additional combinations of numbers of teeth of planetary gear but also in further calculations to jointly use the existing locking contours for each pair of wheels, as well as to assess in advance the possibility of cutting the gears whose engagement angles will satisfy the selected parameter at the stage of synthesis of the planetary mechanism.

**Keywords:** gears; engagement angle; general equations; satellite; gear ratio; planetary mechanism; coupled wheels; uncoupled wheels; synthesis of the planetary mechanism.

**Гереш Тетяна Вікторівна** – асистент каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Кавецький Сергій Миколайович** – аспірант каф. теорії та системи автоматизованого проектування механізмів та машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

**Tatiana Heresh** – Assistant of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: t.geresh@khai.edu, ORCID: 0000-0001-6773-1607.

**Sergey Kavetsky** – PhD student of Department of Theory and Systems of Automated Design of Mechanisms and Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: skaveckiy@gmail.com.