

## Способи механічної стабілізації частоти обертання електричного генератора силової установки

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

При дослідженні електричної бортової системи транспортного засобу в цілому необхідно розглянути динамічні характеристики усіх її складових. Розглянуто одну із ланок системи – механічний варіатор для стабілізації частоти обертання ротора генератора. При приводі генератора від авіаційного двигуна виникають чинники, що перешкоджають його стабільній роботі. Частота обертання приводного двигуна постійно змінюється, тому виникає задача, пов'язана з створенням якісної системи механічної стабілізації частоти обертання.

Розглянуто можливі методи стабілізації частоти обертання ротора електрогенератора шляхом використання безступінчастих варіаторів. При аналізі можливих типів безступінчастих варіаторів обрано механічні варіатори, які мають ряд переваг перед іншими типами. Це їх компактність, низька вартість, високий ККД та ін. Зокрема, запропоновано використовувати як стабілізатори диференціальні зубчасті механізми різних схем: диференціальний варіатор, виконаний з використанням схем  $\overline{IA}$ , а також диференціальний механізм  $\overline{AIA}$  з вільним водилом. В першому випадку стабілізація забезпечується за рахунок гальмування однієї з ланок до повної зупинки, в іншому – гальмування змінює швидкість ланок до необхідної величини. Як пристрої, що забезпечують саморегулювання вихідної частоти обертання, запропоновано використовувати регулятори швидкості, принцип дії яких заснований на використанні відцентрової сили, яка змінюється при зміні частоти обертання на вході в варіатор. В одному з них гальмування ланок відбувається за допомогою важеля і фрикційних дисків, в іншому – за рахунок переміщення кульок модифікованого упорного підшипника. На конкретному прикладі для диференційного механізму  $\overline{AIA}$  показано, яким чином необхідно провести кінематичний і силовий розрахунок, щоб забезпечити сталість вихідної швидкості при зміні швидкості на вході в межах  $\pm 6\%$ .

**Ключові слова:** регулятор швидкості, електрогенератор, диференціальний зубчастий механізм, відцентрова сила.

Електрична бортова система на транспортних засобах має виключне значення. Особливо це стосується літаків, де відхилення параметрів струму живлення може привести до виходу з ладу електричного устаткування, а іноді – до катастрофи. При приводі генератора від двигуна виникають чинники, що перешкоджають його стабільній роботі. Передусім, частота обертання завжди непостійна, крім того, навіть при постійній швидкості обертання приводного двигуна навантаження на генератор постійно змінюється, отже, задача полягає у тому, щоб забезпечити якісну систему механічної стабілізації частоти обертання ротора електричного генератора. Для того щоб досліджувати систему в цілому (в нашому випадку це електрична бортова система), необхідно розглянути динамічні характеристики усіх її складових. Знаючи електричні і механічні параметри елементів, необхідно знайти їх передатні характеристики при різних перехідних процесах, які дозволять створити динамічну модель системи [1]. Розглянемо одну із ланок системи – механічний варіатор для стабілізації частоти обертання ротора генератора.

В процесі роботи авіаційної допоміжної силової установки частота

обертання на вході в генератор змінюється досить суттєво – в межах  $\pm 6...10\%$ . В цьому дослідженні розглянуто можливість застосування безступінчастого механічного варіатора для стабілізації частоти змінного струму на виході з генератора за рахунок постійності частоти обертання його ротора.

Існують три основні види безступінчастих варіаторів [2]: механічні, гідравлічні і електричні. Механічні варіатори отримали значне поширення внаслідок їх компактності, низької вартості, високого ККД та інших переваг [3]. Так, зокрема, об'єм варіатора, віднесений до об'єму стандартного мотора, складає: для механічних варіаторів 100-400%, для гідравлічних - 400-500%, для електричних - до 800%.

Крім того, гідравлічні варіатори мають деякі істотні недоліки:

- конструктивна складність, велика кількість ланок, що труться, які працюють при значних механічних напруженнях;
- висока вартість виготовлення і експлуатації;
- потрібна система елементів, що забезпечують подання і відведення рідини в зону контакту;
- невеликий діапазон робочих температур та ін.

Найбільш перспективним типом варіаторів є чисто механічні, серед яких, у свою чергу, розрізняють варіатори, виконані за прямою схемою і замкнені диференціальні [4]. Перші мають один кінематичний ланцюг, що включає механізм безступінчастої зміни передатного відношення, навантажену усією потужністю, що підводиться. Другі складаються з двох кінематичних ланцюгів, замкнених диференціалом. Варіатор розташований в одному з ланцюгів.

У замкнених ланцюгах при певних співвідношеннях між їх кінематичними параметрами можна здійснити розподіл потужності по ланцюгах, що забезпечує деяке розвантаження варіатора, розміри і маса якого є визначальними для передачі в цілому. Тому замкнені схеми можуть бути легшими, компактнішими і більш економічними, ніж виконані за прямою схемою.

Серед механічних схем варіаторів за деякими показниками мають перевагу планетарні схеми. З їх допомогою можна робити регулювання параметрів в широкому діапазоні, зменшити габарити і масу за рахунок більшої кількості потоків потужності, розвантажити вали від вигину і опори - від радіальних сил.

Розглянемо приклади механічних варіаторів з використанням диференціальних зубчастих передач.

Приклад 1. На рис. 1 показано диференціальний планетарний варіатор. Зліва розташовано мультиплікатор, до складу якого входять колеса  $z_1', z_2', z_3'$ , водило  $H_1$  і гальмо  $T_1$ . Справа – редуктор (колеса  $z_1'', z_2'', z_3''$ , водило  $H_2$  і гальмо  $T_2$ ). Диференціал виконано з використанням схеми  $\overline{IA}$ , в якій провідною ланкою є водило  $H_1$ .

З моменту запуску до виходу на номінальний режим обидва диференціали (у лівій, мультиплікативній частині, і в правій, редукторній) мають передатне відношення, рівне 1:  $i_{H_1 z_3'} = 1$  и  $i_{z_3'' H_2} = 1$ .

При цьому  $n_{H_1} = n_{z_3'} = n_{z_1'}$  і  $n_{H_2} = n_{z_3''} = n_{z_1''}$ , а колеса  $z_1'$  та  $z_1''$  пов'язані з колесами  $z_3'$  та  $z_3''$ . У випадку  $n_H = n_z = n_1$  відносного руху немає і втрати усередині диференціалів практично відсутні.

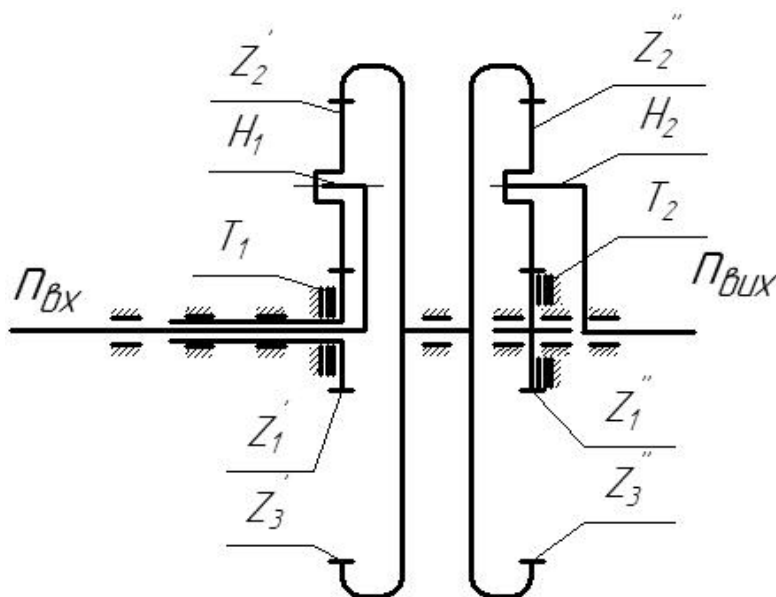


Рис. 1

Коли обороти на вході зростають аж до максимально допустимих, для регулювання використовується редуктор, і за рахунок гальмування колеса  $z_1'$  передатне відношення збільшується від 1 до необхідного для того, щоб вихідна частота знизилася до номінальної. У нашому випадку (для схеми  $\overline{IA}$  передатне відношення збільшиться до  $i_{3''H_2}^1 = 1 + z_1''/z_{23}''$ , і підбором чисел зубів можна забезпечити потрібне передатне відношення.

При зниженні частоти обертання від номінальної аж до мінімальної спрацьовує мультиплікатор, в якому ведучим буде водило  $H_1$ , а веденими – колеса  $z_1'$  і  $z_3'$ . Колесо  $z_1'$  гальмується до повної зупинки при вхідній частоті обертання, рівній мінімально допустимій.

Для цього використовуємо таку ж схему  $\overline{IA}$ , як і для редуктора, і передатне відношення буде змінюватися від 1 до  $i_{H_1 z_3'}^1 = 1/i_{z_3' H_1}^1$ .

Гальмування у варіаторі може здійснюватися різними способами. Нижче наведені два приклади регуляторів, що використовують для гальмування ланок відцентрові сили, що змінюються при зміні швидкості обертання.

1. Гальмування за допомогою важеля і фрикційних дисків (рис. 2). При зміні частоти обертання за рахунок відцентрових сил розташована на важелі маса  $m$  повертає важіль, внаслідок чого зміщуються гальмівні диски, і відбувається гальмування потрібного колеса, яке пов'язане з диском.

2. Розглянемо ще один варіант: колесо диференціала (праворуч), в яке вмонтовано кільце упорного підшипника з профільованою канавкою (рис. 3). З іншого боку (ліворуч) кулька котиться по нерухомому кільцю з площиною, яка має нахил.

Це кільце спирається на пружний елемент, підбираючи жорсткість якого можна налаштувати необхідні переміщення кульки по доріжці кочення.

При збільшенні частоти обертання ростуть відцентрова сила, сила притиснення кульки і момент гальмування.

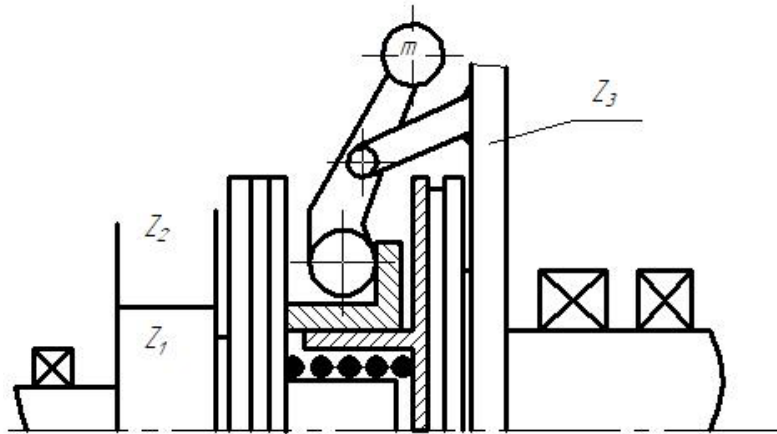


Рис. 2

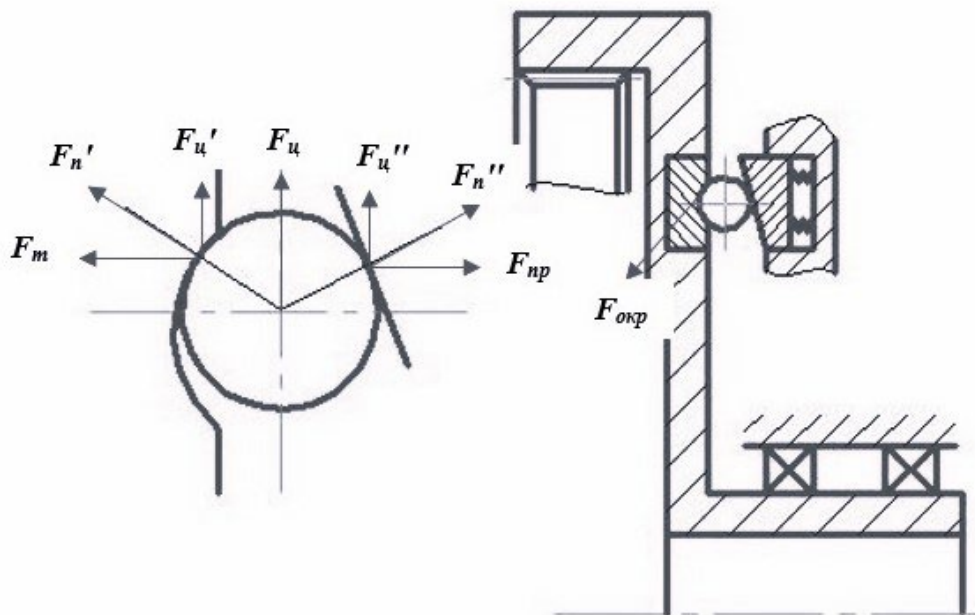


Рис. 3

Відцентрова сила, що діє на кульку, сприймається кільцем підшипника і кільцем з конічною поверхнею

$$F_{\text{ц}} = F'_{\text{ц}} + F''_{\text{ц}}.$$

В результаті контакту кульки з вказаними поверхнями виникають нормальні сили  $F'_n$  і  $F''_n$ , змінюється сила, яка стискає пружину  $F_{\text{пр}}$ , і сила, яка регулює швидкість ланки диференціала  $F_{\text{торм}}$ :

$$F_{\text{торм}} = F_{\text{пр}}.$$

Внаслідок цього змінюється окружна сила і відповідний момент гальмування:

$$F_{\text{окр}} = F_{\text{торм}} f; \quad T_{\text{торм}} = F_{\text{окр}} r_{\text{конт}}.$$

Приклад 2. В якості стабілізатора швидкості використаємо диференціальний

механізм  $\overline{AIA}$  з вільним водилом (рис. 4).

У цій схемі вхідним елементом є колесо 1, вихідним елементом, який передає обертання на ротор генератора – колесо 5. Постійну швидкість на виході (на колесі 5) можна забезпечити, змінюючи швидкість колеса 3 за допомогою механізму управління, який реагує на зміну швидкості на вході в диференціал.

Розглянемо роботу пристрою на конкретному прикладі. Нехай на вхід в диференціал подається потужність 50 кВт з частотою обертання, яка змінюється в діапазоні  $\pm 6\%$  від номінальної (середньої) частоти  $13000 \text{ хв}^{-1}$ , тобто від 12220 до  $13780 \text{ хв}^{-1}$ . За умовами стабільної роботи генератора частота обертання ротора має бути постійною і дорівнювати  $12000 \text{ хв}^{-1}$  (номінальне передатне відношення редуктора між виходом з силової установки і ротором генератора  $u_{15} = 13000/12000 = 1,083$ ).

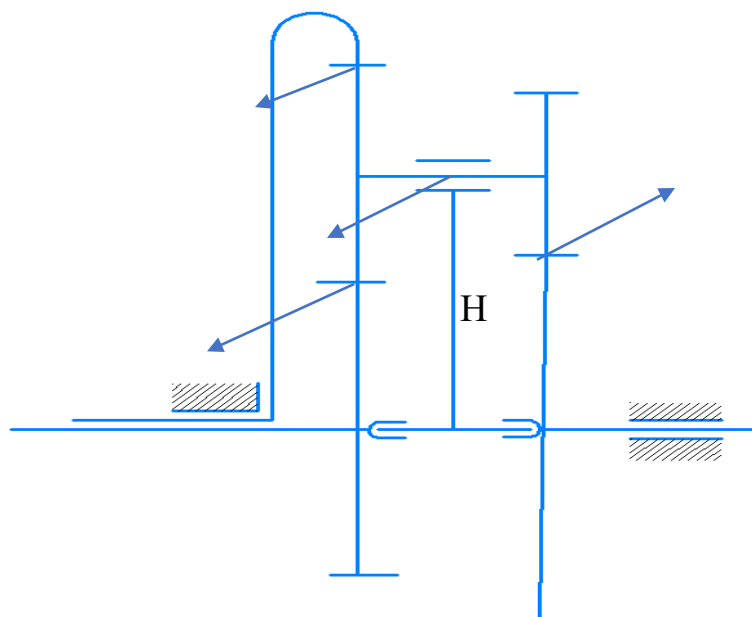


Рис. 4

Вважаємо, що при зупиненому водилі це редуктор з передатним відношенням

$$u_{15} = u_{12} u_{45} = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21.$$

Завданням кінематичного розрахунку є визначення необхідних для цього частот обертання ланок  $n_H$  і  $n_3$ .

Запишемо кінематичні співвідношення для різних складових передач. У відповідність з формулою Віліса для гілки  $\overline{AI}$  (ланки 1, 2, 3)

$$\frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{z_3}{z_1}, \quad (1)$$

для гілки  $\overline{AA}$  (ланки 1, 2, 4, 5)

$$\frac{n_1 - n_H}{n_5 - n_H} = -\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_5}.$$

Так як  $n_2 = n_4$ , то

$$\frac{n_1 - n_H}{n_5 - n_H} = \frac{z_2 \cdot z_5}{z_1 \cdot z_4} \quad (2)$$

Використовуючи вирази (1) і (2), визначимо невідомі частоти обертання  $n_H$  і  $n_3$  для випадків роботи на мінімальній, номінальній і максимальній частотах обертання (таблиця. 1).

Таблиця 1

Елемент	Позначення	Частота обертання елемента, хв <sup>-1</sup>		
		мінімальна	номінальна	максимальна
Колесо 1	$n_1$	12 220	13 000	13 780
Колесо 5	$n_5$	12 000	12 000	12 000
Водило	$n_H$	10 952	7 238	3 524
Колесо 3	$n_3$	10 556	5 437	319

Кінематичний розрахунок цього диференціального механізму  $\overline{AIA}$  можна провести інакше.

Визначим передаточне відношення механізму із формули Вілліса при  $n_3 = 0$  (планетарний механізм)

$$i_{15}^3 = \frac{1 - i_{13}^H}{1 - i_{53}^H} = \frac{1 + \frac{z_3}{z_1}}{1 + \frac{z_3 \cdot z_4}{z_2 \cdot z_5}}$$

З формули Вілліса, записаної для передачі  $\overline{AI}$

$$\omega_H = \frac{i_{13}^H \cdot \omega_3 - \omega_1}{i_{13}^H - 1};$$

$$n_3 = \frac{n_5(i_{13}^H - 1) - n_1(i_{53}^H - 1)}{i_{53}^H(i_{13}^H - 1) - i_{13}^H(i_{53}^H - 1)}.$$

Результати, отримані з використанням цього підходу, практично не відрізняються від знайдених вище.

Для того, щоб визначити, які сили і моменти повинні діяти на ланки даного диференціального механізму, щоб забезпечити необхідні частоти їх обертання, проведемо силовий розрахунок.

Силовий розрахунок полягає у визначенні сил і моментів, що діють на ланки механізму. Для вирішення цього завдання використовуємо три рівняння.

1. *Баланс потужностей*. У цьому диференціальному механізмі потужність розподіляється на два потоки: до споживача через колесо 5 і на регулювання через колесо 3

$$P_{\text{вх}} = P_5 + P_3 = T_3 \omega_3 + T_5 \omega_5 = F_{t3} r_3 \omega_3 + F_{t5} r_5 \omega_5. \quad (3)$$

2. *Рівняння рівноваги моментів для блока сателітів (колеса 2-4):*

$$F_{t4} r_4 + F_{t32} r_2 = F_{t12} r_2. \quad (4)$$

3. *Рівняння рівноваги сил:*

$$F_{t4} = F_{t12} + F_{t32}. \quad (5)$$

Так як  $F_{t3} = F_{t32}$ ,  $F_{t4} = F_{t5}$ ,  $F_{t1} = F_{t12}$ , то задачу приводимо до визначення трьох невідомих сил  $F_{t3}$ ,  $F_{t5}$ ,  $F_{t1}$  із системи трьох рівнянь (3), (4) и (5), записаних вище.

Розміри коліс було знайдено за умови, що модулі коліс рівні 2 мм. Отримані дані були зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Сила, Н	Сили при частоті $n_1$ , хв <sup>-1</sup>		
	12220	13000	13780
$F_{t1}$	1031,0	1085,9	1146,9
$F_{t5}$	1080,0	1137,5	1201,5
$F_{t3}$	49,1	51,7	54,6

Таким чином, змінюючи силу і момент на колесі 3, зокрема, збільшуючи момент опору обертанню при збільшенні швидкості на вході, можна за допомогою пристрою регулювання гальмувати колесо 3 таким чином, щоб забезпечити постійну частоту обертання на колесі 5, тобто на вході в генератор.

### Список літератури

1. Бінковська, А. Б. Аналіз системи стабілізації швидкості оберту привода електричного генератора / А. Б. Бінковська, Р. І. Мамедов / Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. – Харків, ХНАДУ, 2021. – 246 с. – с. 8–10.
2. Мальцев, В. Ф. Импульсивные вариаторы. М., «Машгиз», 1963.
3. Благоврагов, А. А. Механические бесступенчатые передачи нефрикционного типа. – М.: Машиностроение, 1977. – 143 с.
4. Будник, В. С. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, В. И. Кузнецов, Н. П. Артеменко та ін. Киев: Наукова думка, 1986. – 175.

### References

1. Binkovska, A. B. Analiz systemy stabilizatsii shvydkosti obertu pryvoda elektrychnoho heneratora / A. B. Binkovska, R. I. Mamedov / Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv na transporti ta u vy-robnnytstvi. Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh. – Kharkiv, KhNADU, 2021. – 246 s. – s. 8–10.
2. Maltsev, V. F. Ympul'sywnye va-ryatory. M., «Mashhyz», 1963.
3. Blahonravov, A. A. Mekhanycheskye besstupenchatyie peredachy nefryk-tsyonnoho typu. – M.: Mashynostroenye, 1977. – 143 s.
4. Budnyk, V. S. Ynertsyonnye mekhanycheskye enerhoakkumulyruiushchye systemy / V. S. Budnyk, N. F. Svrydenko, V. Y. Kuznetsov, N. P. Artemenko ta in. Kyev: Naukova dumka, 1986. – 175.

Надійшла до редакції 21.12.2023, розглянута на редколегії 21.12.2023

## Mechanical stabilization of the electrical generator's rotation frequency

When studying the electrical on-board system of the vehicle as a whole, it is

necessary to consider the dynamic characteristics of all its components. One of the links of the system is considered - a mechanical variator for stabilizing the frequency of rotation of the generator rotor. When the generator is driven by an aircraft engine, there are factors that prevent its stable operation. The rotation frequency of the drive motor is constantly changing, so there is a problem related to the creation of a high-quality system of mechanical stabilization of the rotation frequency. Possible methods of stabilizing the frequency of rotation of the electric generator rotor by using stepless variators are considered. When analyzing the possible types of stepless variable speed variators, mechanical variators were chosen, which have a number of advantages over other types, such as their compactness, low cost, high efficiency, etc. In particular, it is proposed to use differential gear mechanisms of various schemes as stabilizers: a differential variator made using schemes IA and AI, as well as a differential mechanism AI with a free carrier. As devices that provide self-regulation of the output rotation frequency, it is proposed to use speed regulators, the principle of operation of which is based on the use of centrifugal force, which changes when the rotation frequency changes at the input to the variator. A concrete example for a differential mechanism (AI) shows how to perform kinematic and force calculations to ensure constancy of the output speed when the input speed changes within  $\pm 6\%$ .

**Key words:** speed controller, electric generator, differential gear mechanism, centrifugal force

### **Відомості про авторів**

**Доценко Володимир Миколаевич** – д-р техн. наук, професор кафедри 202, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [dovl202@ukr.net](mailto:dovl202@ukr.net), тел. 095-945-91-16, ORCID:0000-0002-4785-4578

**Ковеза Юрій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри 202, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [i.koveza@khai.edu](mailto:i.koveza@khai.edu), 050-325-13-88, ORCID: 0000-0003-1131-1405

**Усик Віктор Васильович** – канд. техн. наук, доцент кафедри 202, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [v.usik@khai.edu](mailto:v.usik@khai.edu).

### **About the Authors**

**Dotsenko Volodimir Mikolaevich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department 202, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: [dovl202@ukr.net](mailto:dovl202@ukr.net), tel. +(380)50-945-91-16, ORCID:0000-0002-4785-4578

**Koveza Yuriy Volodimirovich** – Ph.D, Associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic Mechanical Systems, Faculty of Aircraft Engines, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. E-mail: [i.koveza@khai.edu](mailto:i.koveza@khai.edu). ORCID: 0000-0003-1131-1405

**Usik Viktor Vasilyovich** – Ph.D, Associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic Mechanical Systems, Faculty of Aircraft Engines, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. E-mail: [v.usik@khai.edu](mailto:v.usik@khai.edu). ORCID: 0000-0003-0452-3266.