

УДК 629.735.45.03:004.942

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.10

В. Ф. МИРГОРОД¹, І. М. ГВОЗДЕВА²¹ АТ «Елемент», Одеса, Україна² Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДИК МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНОЇ ТРАНСМІСІЇ ГВИНТОКРИЛА

При створенні сучасних систем автоматичного управління силовими установками гвинтокрилів, які використовують газотурбінний привід, виникає низка складних науково-прикладних проблем та завдань. Такі проблеми зумовлені специфікою навантаження та газотурбінного приводу. Навантаження силової установки гвинтокрила складає редукторну частину, трансмісію та гвинтову групу. Трансмісія за необхідної довжини валів поєднання має пружні властивості, а гвинтова група – інерційне навантаження. Джерело енергії силової установки є вільна турбіна газотурбінного двигуна, яка не має безпосереднього механічного зв'язку з газогенератором, а має тільки газодинамічний зв'язок. Властивості такого зв'язку потребують окремого дослідження. Тому має місце важливе науково-прикладне завдання аналізу взаємодії частин динамічної системи, які складає взагалі силову установку гвинтокрилів. Вирішення вказаного науково-прикладного завдання може бути досягнуто в поточний час засобами математичного та комп'ютерного моделювання. Методики такого моделювання повинні відповідати, по-перше, адекватності пропонованих моделей, по-друге можливостям пропонованих методик моделювання для подальшого удосконалення систем автоматичного управління силовою установкою. Найбільш важливим питанням такого аналізу є встановлення резонансних частот збудження коливань трансмісії із гвинтовою групою та рівнем їх демпфування в залежності від навантаження гвинта та частоти його обертання. Такі дані можуть бути вихідними щодо проектування цифрової системи управління газотурбінним двигуном для обрання заходів уникнення можливого збудження небажаних коливань. Тому мета пропонованого дослідження у вигляді аналізу та порівняння методик моделювання пружної трансмісії гвинтокрила є актуальною і важливою для вирішення прикладних завдань. Об'єктом досліджень є динамічні процеси в трансмісії гвинтокрила із урахуванням гвинтової групи. Предметом досліджень є методики моделювання динамічних процесів у трансмісії гвинтокрила для отримання вихідних параметрів, необхідних, щодо до синтезу систем автоматичного управління.

Ключові слова: математичне моделювання; силові установки; газотурбінний двигун; гвинтокрил.

Вступ

Проектування та реалізація систем автоматичного управління (САУ) силовими установками (СУ) літальних апаратів, зокрема, гелікоптерів, потребує вирішення низки науково-прикладних завдань великого ступеню складності та значних часових інтервалів. Скорочення часу проектування САУ в поточний час досягається за допомогою застосування методів математичного та комп'ютерного моделювання, які можуть замінити деякі етапи стендових та натурних випробувань. Достовірність отримуваних за допомогою таких методів результатів цілком визначається адекватністю пропонованих методик математичного моделювання та відповідністю програмно-алгоритмічних засобів поставленим завданням.

Існуючі, та вживані методики моделювання СУ літальних апаратів, зокрема, гелікоптерів, відрізняються різноманітністю обмежень щодо математичних моделей та пропонованих засобів моделювання.

Особливості СУ гелікоптера, що визначається динамікою навантаження завдяки пружності трансмісії,

продукує протиріччя між затребуваними рішеннями та можливими, за відомими методиками моделювання.

Тому дослідження та порівняння методик моделювання СУ гвинтокрилів, що враховують пружність трансмісії, є актуальним та важливим науково-прикладним завданням.

1. Формулювання проблеми

Силовa установка гелікоптера має суттєві особливості щодо математичного опису її динамічного руху, що визначає вимоги до методик моделювання.

По-перше, така СУ є дводвигуновою та навантажена на механічну систему з певними особливостями. По-друге, така механічна система включає власне трансмісію та гвинтову групу, зокрема із дворядним гвинтом. По-третє, СУ гвинтокрила характеризується значним напруженням перетворення енергії.

Особливості СУ гвинтокрила складають значні моменти інерції гвинтів та достатньо значна довжина валів поєднання, що потребує врахування їх пружності. Взаємодія кінетичної енергії динамічного руху гвинтів

та потенційної енергії скручування валів продукує можливість небажаних резонансних коливань трансмісії. Оскільки джерелом енергії руху СУ є вільна турбіна газотурбінного двигуна (ГТД), який керується відповідною САУ, то потенційно може мати місце збудження таких коливань динамікою САУ. Треба врахувати, що динаміка САУ визначається не тільки цифровим регулятором, а також електромеханічною частиною.

Таким чином, встановлення динамічних характеристик трансмісії гвинтокрила засобами математичного моделювання дозволяє заздалегідь визначити зони небезпечних частот збудження та врахувати такі дані при проектуванні САУ.

Найбільш детально методи побудови САУ турбовальних СУ гвинтокрилів розглянуті в роботі [1]. У вказаній роботі запропоновано алгоритми синхронізації двигунів СУ та врахована динаміка трансмісії. Детальний аналіз СУ гвинтокрила, що враховує крутильну жорсткість трансмісії, надано в [2]. Вимоги, щодо систем управління СУ гелікоптерів, деталізовано в [3]. Сучасний погляд на питання моделювання СУ на базі газотурбінних двигунів ілюструє [4].

Метою пропонованого дослідження є вирішення вказаного протиріччя, що пропонується шляхом аналізу та порівняння методик моделювання пружної трансмісії гвинтокрила на прикладі гвинтокрила із дворядним гвинтом.

2. Вирішення проблеми

2.1. Об'єкт дослідження

Суттєвий вплив крутильних коливань, що виникають в СУ гелікоптерів, є практично встановленим фактом, що визначає можливість застосування САУ для використання в таких установках. Кінематична схема трансмісії гелікоптера із дворядним гвинтом за розробником має вигляд, що наведено на рис.1.

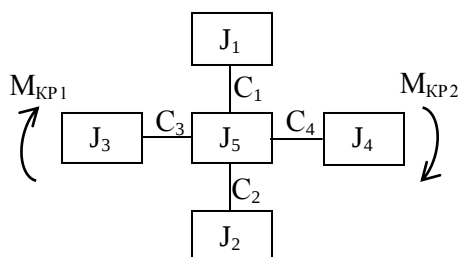


Рис. 1. Кінематична схема трансмісії силової установки
 J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 – моменти інерції нижнього, верхнього несучих гвинтів, першого та другого ГТД (вільних турбін та редукторів), редуктора;
 $C_1, C_2, C_3 = C_4$ – крутильні жорсткості валів гвинтів (з урахуванням пружності лопатей) та валів між двигунами і головним редуктором;
 $\Delta\phi_k$ – зміна кутів скручування

2.2. Порівняння методик моделювання пружної трансмісії гвинтокрила

Математична модель (ММ) пружної трансмісії гвинтокрила складає систему нелінійних, в загальному випадку, диференціальних рівнянь руху, для вирішення яких застосовуються різноманітні програмно-алгоритмічні засоби.

Такі засоби відрізняються обмеженнями щодо використання та особливостями візуально-орієнтованого інтерфейсу. Важливим питанням, щодо вирішення завдань синтезу САУ, є можливості методик моделювання до отримання відповідних результатів, пристосованих до методів синтезу регуляторів.

Тому в наступному розглядаються в основному наступні методики моделювання: безпосереднє рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь руху, метод електромеханічної аналогії (ЕМА), застосування візуально – орієнтованих програмних засобів моделювання.

- Моделювання пружної трансмісії гвинтокрила безпосереднім рішенням системи нелінійних диференціальних рівнянь руху

Питання обчислювального рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь не є оригінальним та має широку множину варіантів відповідно вимог до алгоритмів таких рішень та надання результатів.

Переваги такої методики становлять: універсальність застосування, можливість вибору алгоритмів обчислювального рішення (Рунге-Кутти, Адамса та інших), наявність множини програмних продуктів рішення.

Недоліки щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: результати рішення є функції часу, що достатньо для аналізу, але недостатньо для задач синтезу САУ; складність отримання рішень із змінною правою частиною диференціальних рівнянь; складність отримання частотних характеристик, важливих для завдань синтезу САУ; складність отримання рішень для динамічних систем із суттєво різним часом руху складових («жорстких» систем).

Слід зауважити, що моделювання за пропонованою методикою є необхідним етапом досліджень, оскільки всі інші базуються на вирішенні рівнянь руху.

- Моделювання пружної трансмісії гвинтокрила методом електромеханічної аналогії

Метод електромеханічної аналогії базується на подібності рівнянь Лагранжа руху складових трансмісії відповідним рівнянням рівноваги електричних кіл. В такій аналогії моменту інерції відповідає індуктивність, пружності – величина, зворотна ємності, втратам – опір. Тому струм в електричному ланцюгу відповідає зміні кутів скручування, а напруга на елементах відповідає складовим моментів.

Математична модель трансмісії гелікоптера за розробником (див. рис.1), допускає деталізацію для режиму малих відхилень від усталеного режиму [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} I_k \Delta \ddot{\varphi}_k + C_k \Delta \dot{\varphi}_k - C_k \varphi_5 &= 0, \\ \sum_{k=1}^4 C_k (\Delta \varphi_k - \varphi_5) &= 0, \\ k &= 1 \dots 4. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Фрагмент відповідної моделі за методом ЕМА наведено на рис. 2, де враховано найбільш суттєві складові, оскільки крутильні жорсткості валів гвинтів та поєднувальних валів несумірні.

Оскільки вихідна наближена модель є лінійною, то має аналітичний розв'язок і можуть бути заздалегідь встановлені частоти вільних коливань в залежності від параметрів трансмісії.

Звісно, резонансні частоти вільних коливань за аналітичним розрахунком співпадають з даними моделювання.

Логарифмічна частотна характеристика трансмісії за вихідним моментом скручування представлено на рис. 3.

Переваги методики ЕМА становлять: подібність схеми електричного ланцюга кінематичній схемі трансмісії, що дозволяє врахувати вплив окремих її елементів на загальну динаміку, можливість

доповнення схеми додатковими елементами, універсальність застосування, наявність розвинутої теорії та множини програмних продуктів рішення рівнянь електричних ланцюгів. **Недоліки** щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: складність врахування початкових умов при вирішенні задачі Коші та граничних умов при вирішенні

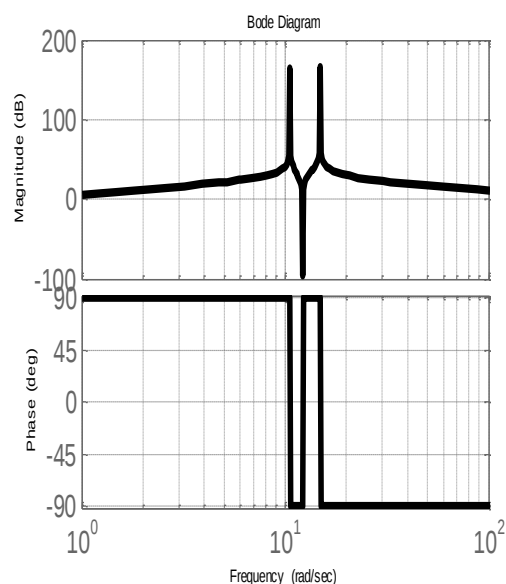


Рис. 3. Логарифмічна частотна характеристика трансмісії за вихідним моментом скручування методом ЕМА

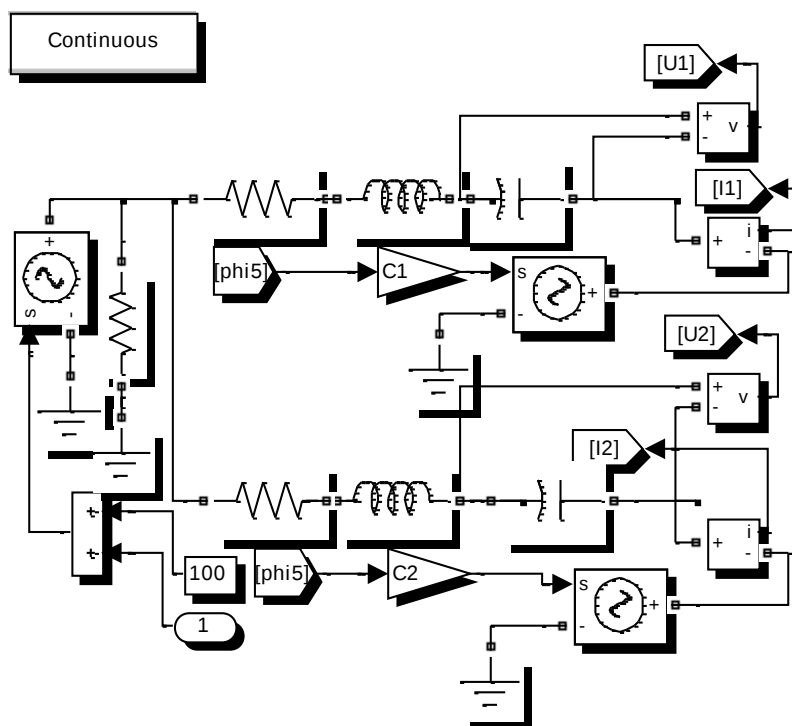


Рис. 2. Фрагмент моделі трансмісії за методом ЕМА

крайової задачі, складність реалізації нелінійних взаємодій між елементами досліджуваної динамічної системи, складність отримання рішень для динамічних систем із суттєво різним часом руху складових («жорстких» систем).

Моделювання пружної трансмісії гвинтокрила за методикою застосування візуально – орієнтованих програмних засобів

Моделювання пружної трансмісії гвинтокрила із дворядним гвинтом за методикою застосування візуально – орієнтованих програмних засобів спирається на низку досконалих програмних продуктів, із яких в першу чергу потрібно вказати додаток Simulink інтерактивного середовища MATLAB та програмний продукт віртуальних приладів LabVIEW.

Найбільш досконалим засобом моделювання щодо вирішенні поставленого завдання, є застосування додатка Simulink інтерактивного середовища MATLAB.

Для ілюстрації можливостей пропонованої методики використана більш складна нелінійна модель динамічної системи пружної трансмісії гвинтокрила із дворядним гвинтом, що використовується в [1], яка враховує демпфування, залежність від кута завантаження гвинтів та частоти обертання гвинтів.

Фрагмент відповідної моделі за пропонованою методикою наведено на рис. 4.

Логарифмічна частотна характеристика трансмісії за вихідним моментом скручування представлено на рис. 5.

Для верифікації отриманих результатів використано комп'ютерний експеримент, що складається у збудженні системи широкосмуговим збуренням у вигляді сигналу із лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ). Огинаюча виходу системи відтворює амплітудну частотну характеристику.

Результати такого аналізу представлено на рис. 6.

Частоти резонансів співпадають із попереднім результатом з точністю до третього знаку за комою, та відповідають даним за [2].

Переваги пропонованої методики становлять: універсальність застосування, можливість вибору алгоритмів обчислювального рішення (Рунге-Кутти, Адамса та інших), можливість використання інших додаткових продуктів додатка Simulink інтерактивного середовища MATLAB, можливість інтеграції ММ в загальну модель дводвигунової установки.

Недоліки щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: складність побудови моделі, складність вибору алгоритмічних продуктів для аналізу досліджуваної динамічної системи, складність отримання рішень для динамічних систем із суттєво різним часом руху складових («жорстких» систем).

Автори не ставили на мету отримати реальні частотні характеристики розглянутої трансмісії, оскільки це потребує порівнянні з даними експериментальних досліджень. В межах мети досліджень виконується лише порівняння різних методик моделювання пружної трансмісії гвинтокрила на прикладі гвинтокрила із дворядним гвинтом

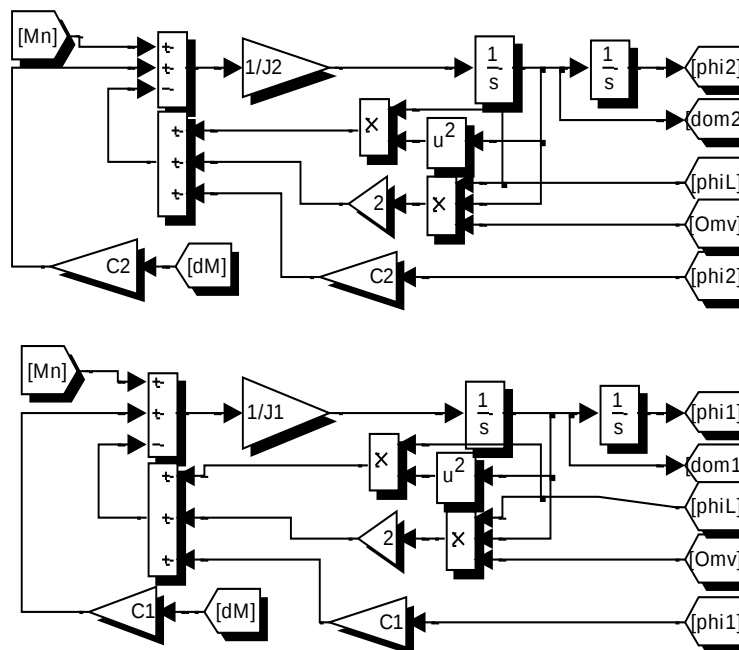


Рис. 4. Фрагмент Simulink– моделі трансмісії

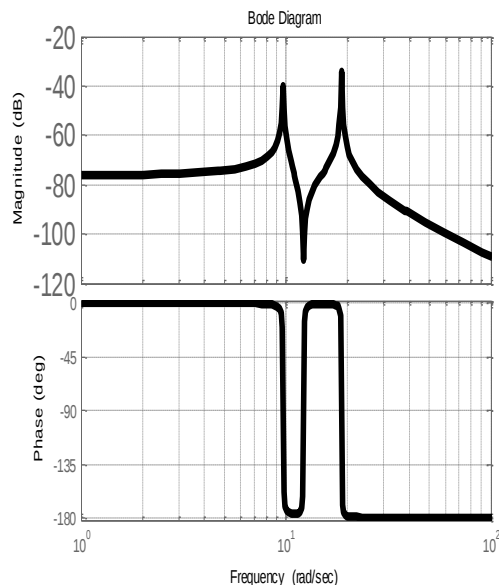


Рис. 5. Логарифмічна частотна характеристика трансмісії за вихідним моментом скручування за додатком Simulink

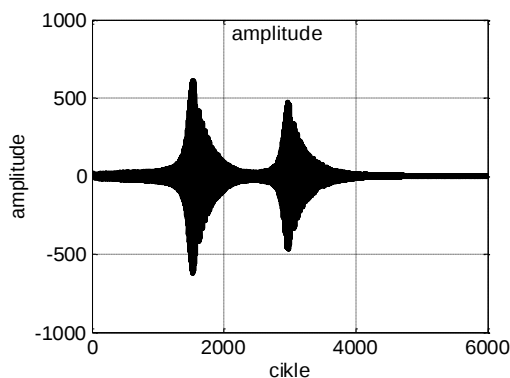


Рис. 6. Вихідна реакція за моментом скручування при збудженні ЛЧМ - сигналом

Висновки

Мета дослідження у вигляді аналізу та порівняння методик моделювання пружної трансмісії гвинтокрила на прикладі гвинтокрила із дворядним гвинтом, досягнута шляхом розгляду низки таких методик, встановлення їх можливостей та обмежень щодо застосування, отримання частотних характеристик за різними методиками методами комп'ютерного моделювання.

Найбільш доцільним та раціональним підходом за результатами проведеного аналізу, слід вважати комплексне поєднання відомих та пропонованих методик моделювання, де метод ЕМА може бути пропонованим як попередній перевірючий етап дослідження, а методики безпосереднього моделювання

можуть бути застосовані для отримання верифікованих результатів. Слід зауважити, що для отримання частотних характеристик навантаження потрібно застосовувати альтернативні та незалежні методи, як це пропонується в наданому дослідженні.

Перспективи подальших досліджень пропонуються у інтеграції математичних моделей навантаження в СУ гвинтокрила в загальну ММ із урахуванням динаміки цифрових систем регулювання параметрами ГТД.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **І. М. Гвоздева**; розробка методики – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**; аналіз результатів досліджень – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку проф. С. В. Епіфанову.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Миргород, В. Ф. Математическая модель силовой установки вертолета в составе двух турбовальных двигателей с редукторами и двухрядным винтом. Анализ алгоритмов синхронизации [Текст] / В. Ф. Миргород // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2009. – № 7(64). – С. 125-131.
2. Безуглый, С. В. Математическая модель вертолетной двигательной установки, учитывающая крутильную жесткость трансмиссии [Текст] / С. В. Безуглый, & С. В. Епифанов // *Авіаційно-*

космічна техніка і технологія. – 2005. – № 8(24). – С. 218-221.

3. *Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов [Текст]. – М. : Межгосударственный Авиационный Комитет. – 2003. – 54 с.*

4. *Performance Prediction and Simulation of Gas Turbine Engine Operation [Text] / Report of the RTO Applied Vehicle Technology Pan(AVT) Task Group AVT-018. // Printed by St. Joseph Ottawa/Hull (A St. Joseph Corporation Company) 45 Sacre'-Cœur Blvd., Hull (Que'bec), Canada J8X 1C6. – P. 356. ISBN 92-837-1083-5*

References

1. Myrhorod, V. F. *Mathematycheskaia moldel sylovoy ustanovki vertolyota v sostavi dvux turbovalnix dvigateley z reduktorom z dvuhradnim vintom* [Mathematical model of a helicopter power plant consisting of two turboshaft engines with a gearbox and a double-row propeller. Analysis of synchronization algorithms]. *Aviacijno-kosmichna*

texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology, 2009, no. 7(64), pp. 125-131.

2. Bezugly, S., Epifanov, S. *Mathematycheskaia moldel vertolyotnoy dvigatelnoy ustanovki, uchitvaychey krutitnuy zestkost transmissy* [Mathematical model of a helicopter propulsion system, taking into account the torsional rigidity of the transmission]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2005, no. 8(24), pp. 218-221.

3. *Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов*. Moscow, Mezghosudarstvennyj Avyacyonnyj Komitet - Intergovernmental Aviation Committee Publ., 2003. 54 p.

4. *Performance Prediction and Simulation of Gas Turbine Engine Operation / Report of the RTO Applied Vehicle Technology Pan(AVT) Task Group AVT-018. Printed by St. Joseph Ottawa/Hull (A St. Joseph Corporation Company) 45 Sacre'-Cœur Blvd., Hull (Que'bec), Canada J8X 1C6. 356 p, ISBN 92-837-1083-5.*

Надійшла до редакції 12.05.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

COMPARISON OF MODELING METHODS OF ELASTIC PROPELLER TRANSMISSION

Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva

A number of complex scientific and applied problems and tasks arise when creating modern systems for automatic control of rotorcraft power plants that use gas turbine drives. Such problems are due to the specific load and gas turbine drive. The load of the rotorcraft power plant consists of a gear unit, a transmission unit, and a propeller group. The transmission with the required length of the shafts of the combination has elastic properties, and the screw group has an inertial load. The energy source of the power plant is the free turbine of the gas turbine engine, which does not have a direct mechanical connection with the gas generator but only a gas-dynamic connection. The properties of such a connection require separate study. Therefore, there is an important scientific and applied task of analyzing the interaction of parts of the dynamic system that constitute the overall power plant of propellers. Solutions to specified scientific and applied tasks, can be achieved at present by means of mathematical and computer modeling. The methods of such modeling must correspond, first, to the adequacy of the proposed models and, second, to the possibilities of the proposed modeling methods for further improving the automatic control systems of power plants. The most important issue in such an analysis is the establishment of the resonant frequencies of the excitation of transmission vibrations with a screw group and the level of their damping depending on the load of the screw and its rotation frequency. Such data can be the starting point for designing a digital gas turbine engine control system and selecting measures to avoid the possible excitation of unwanted oscillations. Therefore, the purpose of the proposed research in the form of analysis and comparison of methods of modeling the elastic transmission of a rotorcraft, which is relevant and important for solving applied problems. The object of this research is to investigate dynamic processes in the transmission of a rotorcraft, considering the propeller group. The subject of research is the method of modeling dynamic processes in the transmission of a rotorcraft to obtain the initial parameters necessary for the synthesis of automatic control systems.

Keywords: mathematical modeling; power plants; gas turbine engine; rotorcraft.

Миргород Володимир Федорович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб. АТ «Елемент», Одеса, Україна.
Гвоздева Ірина Маратівна – д-р техн. наук, проф., зав. каф. НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Volodymyr Myrhorod – Doctor of Science, Jsc Element, Odesa, Ukraine,
e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000- 0001- 8361-1672.

Iryna Hvozdeva – Doctor of Science, Professor of Odesa Maritime Academy, Odesa, Ukraine,
e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000- 0001- 5797- 0559.