

УДК 683.335.13

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02

## АНАЛІЗУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПОДАЧІ ПАЛИВА У ЦИЛІНДРИ СИЛОВОГО АГРЕГАТУ

А. М. БОРИСЕНКО<sup>1\*</sup>, О. Ф. ЄНІКЄЄВ<sup>2</sup>, Д. Ю. ЗАХАРЕНКОВ<sup>2</sup>, І. С. ЗИКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> кафедра теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, УКРАЇНА

<sup>3</sup> кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Запропоновано ідею моніторингу ідентичності циліндрових потужностей двигуна внутрішнього згоряння в умовах неповної інформації та на її основі побудовано комп'ютерну систему. Як вхідну інформацію використано сигнал миттєвої швидкості обертання колінчастого вала силового агрегату. При розробці архітектури апаратних засобів використано форсунки з п'єзоелектричними виконавчими механізмами, принцип безпосереднього цифрового керування, а також принцип керування зі зворотним зв'язком за станом флуктуацій швидкості обертання колінчастого вала. Як математичний апарат при аналізі структурної схеми комп'ютерної системи програмного керування процесами подачі палива та повітря у циліндри силового агрегату використано перетворення Лапласа. Побудовано математичні моделі компонентів апаратних засобів керування процесами подачі палив-повітряної суміші та у результаті аналізу структурної схеми комп'ютерної системи отримано передавальну функцію. Із використанням можливостей програмного середовища Matlab отримано перехідну та імпульсну перехідну характеристики системи, побудовано годограф Найквіста та встановлено логарифмічні амплітудно-частотні характеристики апаратних засобів. Встановлено, що частотні характеристики математичної моделі комп'ютерної системи мають необхідні динамічні характеристики. Методом розкладання на прості дроби отримано вираз дискретної передавальної функції, коефіцієнти степеневих поліномів якої встановлено за допомогою методу визначників та обчислювальних можливостей програмного середовища Mathcad. На основі дискретної передавальної функції побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу оброблення апаратними засобами сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала. Комп'ютерним моделюванням отримано вихідний сигнал, у результаті аналізу якого встановлено швидкодію апаратних засобів оброблення вхідної інформації.

**Ключові слова:** апаратні засоби; сигнал флуктуацій; частотні характеристики; швидкодія; математичне та комп'ютерне моделювання

## ANALYSIS OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESSES OF FUEL SUPPLY TO THE CYLINDERS OF THE POWER UNIT

А. BORYSENKO<sup>1\*</sup>, О. YENIKIEIEV<sup>2</sup>, D. ZAKHARENKOV<sup>2</sup>, I. ZYKOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, UKRAINE

<sup>3</sup> Department of computer engineering and programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The idea of monitoring the identity of the cylinder capacities of an internal combustion engine under conditions of incomplete information is proposed and a computer system is built on its basis. The signal of the instantaneous rotation speed of the crankshaft of the power unit was used as input information. In the development of the hardware architecture, injectors with piezoelectric actuators, the principle of direct digital control, and the principle of control with feedback on the state of fluctuations of the crankshaft rotation speed were used. The Laplace transform was used as a mathematical apparatus for analyzing the structural diagram of a computer system for programmed control of the processes of supplying fuel and air to the cylinders of the power unit. Mathematical models of the components of the hardware for controlling the processes of supplying the fuel-air mixture were constructed, and as a result of the analysis of the structural diagram of the computer system, the transfer function was obtained. Using the capabilities of the Matlab software environment, the transient and impulse transient characteristics of the system are obtained, the Nyquist hodograph is constructed, and the logarithmic amplitude-frequency characteristics of the hardware are established. It was found that the frequency characteristics of the mathematical model of a computer system have the necessary dynamic characteristics. Using the method of expansion into simple fractions, an expression is obtained for a discrete transfer function, the coefficients of the power polynomials of which are established using the method of determinants and computational capabilities of the Mathcad software environment. On the basis of a discrete transfer function, a scheme for computer modeling of the process of processing the signal of the instantaneous speed of rotation of the crankshaft by hardware is constructed. The output signal was obtained by computer simulation, as a result of the analysis of which the speed of the hardware for processing the input information was established.

**Keywords:** hardware; fluctuation signal; frequency characteristics; speed; mathematical and computer modeling

### Вступ

Техніко-економічні показники дизель-генераторів (ДГ) залежать від розподілу фаз процесів

подачі палива [1–3]. Відомий метод вимірювань індикаторних діаграм кожного циліндру та подальше порівняння з метою оцінювання їхньої ідентичності. Застосування ручної праці, достатньо велика кількість

циліндрів та відсутність вихідних електричних сигналів у первинних перетворювачів тиску суттєво обмежують продуктивність оцінювання ідентичності циліндрових потужностей ДГ. Пропонується ідея на основі опрацювання даних непрямих вимірювань розробити комп'ютерну систему (КС), що встановить ідентичність циліндрових потужностей двигуна. Як джерело вхідної інформації авторами пропонується використати частотно-модульований сигнал швидкості обертання колінчастого валу. За результатами моніторингу КС корегує процеси подачі паливо-повітряної суміші у циліндри [4]. Розв'язання цієї задачі забезпечить економію палива на рівні 5% [5,6], зменшить ймовірність перевантаження деяких циліндрів, суттєво збільшить термін використання силового агрегату й скоротить витрати на профілактику, обслуговування та ремонт.

Програмні рухи КС щодо керування процесами подачі паливо-повітряної суміші у циліндри силових агрегатів можна організувати за допомогою форсунок із електрогідравлічним або п'єзоелектричним виконуючим механізмом. Труднощі розв'язання цієї задачі зумовлено відсутністю апаратних засобів із заданою невизначеністю та швидкодією опрацювання частотно-модульованого сигналу, алгоритмічного та прикладного програмного забезпечення.

#### Мета роботи

Зменшення невизначеності та підвищення швидкодії апаратно-програмних засобів моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ на основі опрацювання даних непрямих вимірювань.

#### Виклад основного матеріалу

Встановити розподіл циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 можливо на основі опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу. За результатами оцінювання апаратні засоби корегують процеси подачі паливо-повітряної суміші у циліндри. Синхронізацію роботи КС із фазою обертання колінчастого валу силового агрегату забезпечує сигнал верхньої мертвої точки першого циліндру. Використано форсунки із п'єзоелектричним керуванням для задавання процесів подачі паливо-повітряної суміші. Структурну схему апаратних засобів наведено на рис. 1. Архітектуру КС складають такі компоненти: давач миттєвої швидкості обертання колінчастого вала (ДЧ), вимірювальний перетворювач (ВП), давач верхньої мертвої точки першого циліндру (ДВМТ), обчислювальний пристрій (мікроЕОМ) та три виконавчі механізми (ВМ1, ВМ2 та ВМ3).

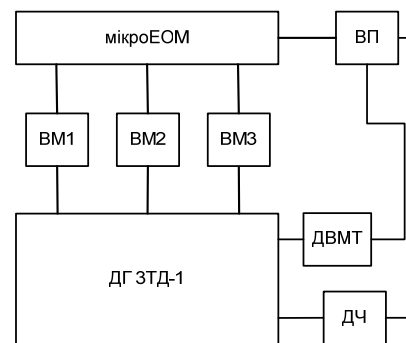


Рис.1 – Архітектура КС

При розробці архітектури КС використано принцип керування зі зворотнім зв'язком за станом сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу. Алгоритмічне забезпечення обчислювальної процедури оцінювання ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 передбачає виконання наступних дій:

- вимірювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу;
- усереднення інформації та формування вибірки у межах одного оберту колінчастого валу;
- отримання масиву дискретних значень сигналу флуктуацій;
- побудова детермінованої математичної моделі крутної схеми ДГ ЗТД-1;
- апроксимація крутних моментів циліндрів;
- розв'язання детермінованої системи лінійних диференціальних рівнянь рухів мас моделі;
- встановлення відхилень від середнього значення циліндрової потужності;
- формування сигналів програмного керування ВМ1, ВМ2 та ВМ3.

Використаємо перетворення Лапласу для подальших досліджень [7–9]. Передавальну функцію каналу КС отримаємо методом структурних перетворень схеми [10,11]. Динамічні властивості форсунок із п'єзоелектричним керуванням дозволяють подати її аперіодичним ланцюгом, який має наступну передавальну функцію [12]

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де  $K_1$  - статичний коефіцієнт посилення,  $T_1$  - постійна часу.

Імпульсні сигнали із заданими фазами та тривалістю керують ВМ1...ВМ3. МікроЕОМ формує сигнали «старт» та сигнали «стоп», які подаються відповідно на «S» та «R» входи тригерів. Динамічні властивості блоків ВМ при перетворенні вхідної інформації дозволяють подати їх аперіодичним ланцюгом, який має таку передавальну функцію [12]

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

де  $k_2 = 0.1$  - коефіцієнт посилення блоку мікроЕОМ,  $T_2 = 0.0021 C$  - постійна часу.

Передавальна функція екстраполятора нульового порядку має вигляд [12]

$$W_3(p) = \frac{\tau_3}{\tau_3 p + 1}, \quad (3)$$

де  $\tau_3$  - запізнення.

Загримкою на спрацьовування RS-тригерів нехтуємо (приблизно 10 нС). Відповідно цей блок подаємо пропорційним ланцюгом із такою передавальною функцією

$$W_4(p) = 1. \quad (4)$$

Блок мікроЕОМ на основі опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу встановлює ідентичність циліндрових потужностей силового агрегату. При наявності їхніх коливань виконує відповідне корегування часу надходжень імпульсів «старт-стоп». Обчислювальні процедури займають деякий проміжок часу, тривалість якого розраховується на підставі кількості команд керуючої програми та тактової частоти системного генератора. Тому блок мікроЕОМ при виконанні обчислювальних процедур подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням [12]. Відповідно, його передавальна функція отримала наступний вигляд

$$W_5(p) = k_5 e^{-p\tau_5}, \quad (5)$$

де  $\tau_5 = 0.01 C$  - запізнення,  $k_5 = 10$  - коефіцієнт перетворення.

За умови обмеження кількості складових подання експоненти останній вираз набуває вигляду

$$W_5(p) = \frac{k_5}{\tau_5 p + 1}, \quad (6)$$

Динамічні властивості блоку ВП сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ дозволяють його подання у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням [12]. Відповідно передавальна функція ВП має наступний вигляд

$$W_6(p) = k_6 e^{-p\tau_6} = \frac{k_6}{\tau_6 p + 1}, \quad (7)$$

де  $k_6 = 2.604 \cdot 10^6$  - коефіцієнт перетворення блоку ВП;  $\tau_6 = 0.051 C$  - запізнення.

Апаратні засоби програмного керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1, математичні моделі яких отримано, з'єднано послідовно. Тому їхня передавальна функція є добуток отриманих функцій і має такий вигляд

$$W_7(p) = k_1 e^{-pT_1} k_2 e^{-pT_2} \tau_3 e^{-p\tau_3} k_3 e^{-p\tau_4} k_4 e^{-p\tau_5} k_5 e^{-p\tau_6}, \quad (8)$$

або наступний

$$W_7(p) = \frac{k_1 k_2 \tau_3 k_3 k_4 k_5}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(\tau_3 p + 1)(\tau_4 p + 1)(\tau_5 p + 1)} \quad (9)$$

Дослідження АЧХ каналів передавання крутних моментів окремих циліндрів ДГ ЗТД-1 проведемо на основі використання передавальних функцій, параметри яких подано у безрозмірному вигляді. У відповідності з цим останні вирази також потрібно подати у безрозмірному вигляді. Нормування коефіцієнту перетворення апаратних засобів програмного керування процесами подачі паливно-повітряної суміші проведемо наступним чином

$$k_1 k_2 \tau_3 k_5 = 1. \quad (10)$$

Після нескладних математичних перетворень виразу (9) отримаємо таке співвідношення

$$W_8(p) = \frac{k_6}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (11)$$

де коефіцієнти знаменника визначаються наступним чином

$$\begin{aligned} a_4 &= T_2 \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_1 \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_5 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_3 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_3 \tau_6; \\ a_3 &= \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_2 \tau_5 \tau_6 + T_2 \tau_3 \tau_6 + T_2 \tau_3 \tau_5 + T_1 \tau_5 \tau_6 + T_1 \tau_3 \tau_6 + \\ &+ T_1 \tau_3 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_3; \\ a_2 &= \tau_5 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_3 \tau_5 + T_2 \tau_6 + T_2 \tau_5 + T_2 \tau_3 + T_1 \tau_6 + \\ &+ T_1 \tau_5 + T_1 T_2 + T_1 \tau_3; \\ a_1 &= T_1 T_2 \tau_3 \tau_5 \tau_6; \quad a_0 = 1. \end{aligned}$$

Методику досліджень частотних характеристик апаратних засобів КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1 розроблено на основі використання можливостей програмного середовища Matlab [13,14]. Командний рядок задавання виразу передавальної функції має наступний вигляд:  $W = \text{tf}([1], [a_5 \ a_4 \ a_3 \ a_2 \ a_1 \ 1])$ . Результати розрахунків частотних характеристик каналу КС подано на рис. 2-6 у вигляді графіків:

- діаграма Bode каналу КС;
- перехідна функція математичної моделі апаратних засобів;
- імпульсна перехідна функція;
- частотний годограф Найквіста;
- запас стійкості за амплітудою та фазою.

Для обчислень дискретної передавальної функції апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу, розкладемо вираз (11) на прості дроби [11]

$$W_9(p) = \frac{A_1 T_1}{p + T_1^{-1}} + \frac{A_2 T_2}{p + T_2^{-1}} + \frac{A_3 \tau_3}{p + \tau_3^{-1}} + \frac{A_4 \tau_5}{p + \tau_5^{-1}} + \frac{A_5 \tau_6}{p + \tau_6^{-1}},$$

де  $A_i$  - коефіцієнти, які потрібно встановити.

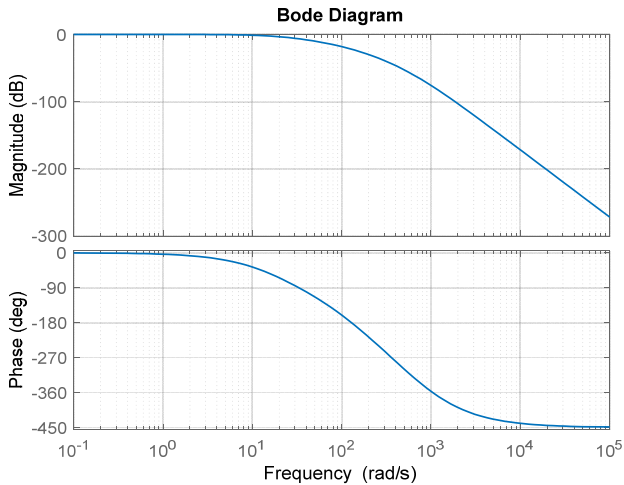


Рис. 2 – Діаграма Bode

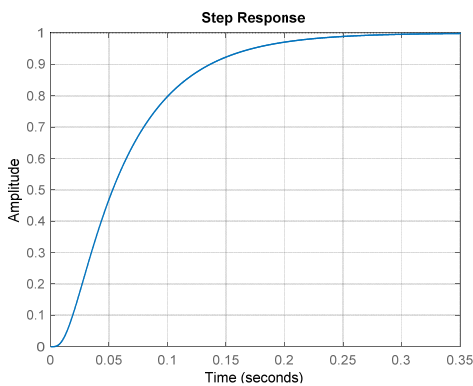


Рис. 3 – Перехідна функція КС

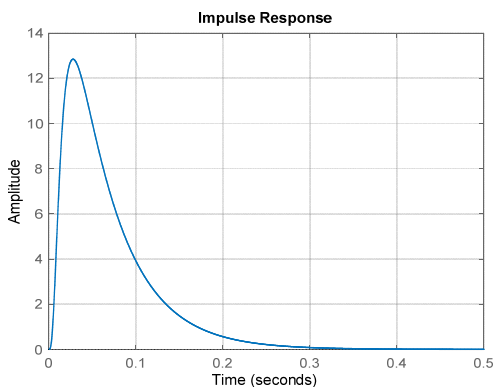


Рис. 4 – Імпульсна перехідна функція

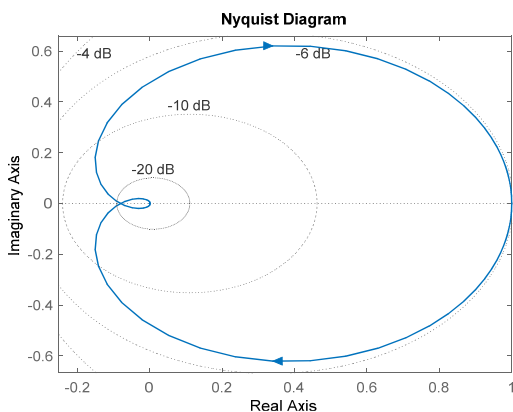


Рис. 5 – Частотний годограф Найквіста

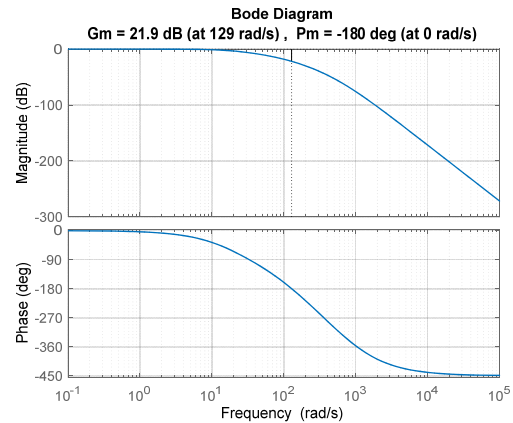


Рис. 6 – Визначення запасу стійкості за амплітудою та фазою

Процедура пошуку коефіцієнтів чисельника й знаменника передавальної функції передбачає виконання наступних дій:

- приводимо вираз до загального знаменника;
- система алгебраїчних рівнянь утворюється шляхом порівняння ступеневих поліномів чисельників виразу (11) та останнього співвідношення.

Після математичних перетворень отримано систему алгебраїчних рівнянь у такому вигляді

$$\begin{cases} b_{11}A_1 + b_{12}A_2 + b_{13}A_3 + b_{14}A_4 + b_{15}A_5 = 2.604 \cdot 10^6 \\ b_{21}A_1 + b_{22}A_2 + b_{23}A_3 + b_{24}A_4 + b_{25}A_5 = 0 \\ b_{31}A_1 + b_{32}A_2 + b_{33}A_3 + b_{34}A_4 + b_{35}A_5 = 0 \\ b_{41}A_1 + b_{42}A_2 + b_{43}A_3 + b_{44}A_4 + b_{45}A_5 = 0 \\ b_{51}A_1 + b_{52}A_2 + b_{53}A_3 + b_{54}A_4 + b_{55}A_5 = 0, \end{cases} \quad (12)$$

де коефіцієнти системи рівнянь визначаються за допомогою наступних виразів

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{T_1}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{12} = \frac{T_2}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{13} = \frac{\tau_3}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{14} &= \frac{\tau_5}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_6}, \quad b_{15} = \frac{\tau_6}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_5}; \\ b_{21} &= \frac{T_1(T_2 + \tau_3 + \tau_6 + \tau_5)}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{22} = \frac{T_2(T_1 + \tau_3 + \tau_6 + \tau_5)}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{23} &= \frac{\tau_3(T_1 + T_2 + \tau_6 + \tau_5)}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{24} = \frac{\tau_5(T_1 + T_2 + \tau_3 + \tau_6)}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_6}, \\ b_{25} &= \frac{\tau_6(T_1 + T_2 + \tau_3 + \tau_5)}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_5}; \\ b_{31} &= \frac{T_1(T_2 \tau_5 + \tau_3 \tau_5 + T_2 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_2 \tau_3)}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{32} &= \frac{T_2(T_1 \tau_5 + \tau_3 \tau_5 + T_1 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_1 \tau_3)}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{33} &= \frac{\tau_3(T_2 \tau_5 + T_1 \tau_5 + T_2 \tau_6 + T_1 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_1 T_2)}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \end{aligned}$$

$$b_{34} = \frac{\tau_5(T_1T_2 + T_1\tau_3 + T_2\tau_6 + \tau_3\tau_6 + T_1\tau_6 + T_2\tau_3)}{T_1T_2\tau_3\tau_6},$$

$$b_{35} = \frac{\tau_6(T_2\tau_5 + \tau_3\tau_5 + T_1T_2 + T_1\tau_3 + T_1\tau_5 + T_2\tau_3)}{T_1T_2\tau_3\tau_5},$$

$$b_{41} = \frac{T_1(\tau_3\tau_5\tau_6 + T_2\tau_6\tau_5 + T_2\tau_3\tau_6 + T_2\tau_3\tau_6)}{T_2\tau_3\tau_6T_5},$$

$$b_{42} = \frac{T_2(\tau_3\tau_6\tau_5 + T_1\tau_6\tau_5 + T_1\tau_3\tau_6 + T_1\tau_3\tau_5)}{T_1\tau_3\tau_6\tau_5},$$

$$b_{43} = \frac{\tau_3(T_2\tau_6\tau_5 + T_1\tau_6\tau_5 + T_1T_2\tau_5 + T_1T_2\tau_6)}{T_1T_2\tau_6\tau_5},$$

$$b_{44} = \frac{\tau_5(T_1T_2\tau_3 + T_1T_2\tau_6 + T_1\tau_3\tau_6 + T_2\tau_3\tau_6)}{T_1T_2\tau_3\tau_6},$$

$$b_{45} = \frac{\tau_6(T_1T_2\tau_3 + T_1T_2\tau_5 + T_2\tau_3\tau_5 + T_1\tau_3\tau_5)}{T_1T_2\tau_3\tau_5},$$

$$b_{51} = T_1, \quad b_{52} = T_2, \quad b_{53} = \tau_3, \quad b_{54} = \tau_5, \quad b_{55} = \tau_6.$$

Для розрахунку величин коефіцієнтів  $A_i$  використовуємо метод визначників та можливості програмного середовища Mathcad [15]. Скрипти розрахунку цих коефіцієнтів подано на рис. 7.

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.609 \times 10^{14}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 2.604 \cdot 10^6 & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ 0 & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ 0 & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.78 \times 10^{13}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} b_{11} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & 0 & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & 0 & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & 0 & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & 0 & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = 1.164 \times 10^{13}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & 0 & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & 0 & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & 0 & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.269 \times 10^{12}$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & 0 & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & 0 & b_{55} \end{vmatrix} = 8.286 \times 10^{12}$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & 2.604 \cdot 10^6 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & 0 \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & 0 \end{vmatrix} = -8.576 \times 10^{11}$$

$$A_1 := \frac{\Delta_1}{\Delta} = 0.111 \quad A_2 := \frac{\Delta_2}{\Delta} = -0.072$$

$$A_3 := \frac{\Delta_3}{\Delta} = 7.888 \times 10^{-3} \quad A_4 := \frac{\Delta_4}{\Delta} = -0.052$$

$$A_5 := \frac{\Delta_5}{\Delta} = 5.332 \times 10^{-3}$$

Рис. 7 – Скрипти розрахунку коефіцієнтів

З метою спрощення математичних перетворень при отриманні дискретної передавальної функції введемо наступні позначення

$$l_1 = e^{-T_0/T_1}, \quad l_2 = e^{-T_0/T_2}, \quad l_3 = e^{-T_0/T_3},$$

$$l_4 = e^{-T_0/T_4}, \quad l_5 = e^{-T_0/T_5},$$

де  $T_0 = 0.0005$  с – шаг ітерацій.

При встановленні дискретної передавальної функції апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 скористаємось таблицею z-перетворень. Після нескладних математичних перетворень її отримано у вигляді відношення двох ступеневих поліномів

$$W_{10}(z) = \frac{b_4^{\circ}z^5 + b_3^{\circ}z^4 + b_2^{\circ}z^3 + b_1^{\circ}z^2 + b_0^{\circ}z}{a_5^{\circ}z^5 + a_4^{\circ}z^4 + a_3^{\circ}z^3 + a_2^{\circ}z^2 + a_1^{\circ}z + a_0^{\circ}}, \quad (13)$$

де  $b_0^{\circ} = A_1l_2l_3l_4l_5 + A_2l_1l_3l_4l_5 + A_3l_1l_2l_4l_5 + A_4l_1l_2l_3l_5 + A_5l_1l_2l_3l_4$ ;

$$b_1^{\circ} = -[A_1(l_2l_3l_4 + l_2l_3l_5 + l_2l_4l_5 + l_3l_4l_5) + A_2(l_1l_3l_4 + l_1l_3l_5 + l_1l_4l_5 + l_3l_4l_5) + A_3(l_1l_2l_4 + l_1l_2l_5 + l_1l_4l_5 + l_2l_4l_5) + A_4(l_1l_2l_3 + l_1l_2l_5 + l_1l_3l_5 + l_2l_3l_5) + A_5(l_1l_2l_3 + l_1l_2l_4 + l_1l_3l_4 + l_2l_3l_4)];$$

$$b_2^{\circ} = A_1(l_2l_3 + l_2l_4 + l_2l_5 + l_3l_4 + l_3l_5) + A_2(l_1l_3 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_3l_4 + l_3l_5) + A_3(l_1l_2 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_2l_4 + l_2l_5) + A_4(l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_5 + l_2l_3 + l_2l_5) + A_5(l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_4 + l_2l_3 + l_2l_4);$$

$$b_3^{\circ} = -[A_1(l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + A_2(l_1 + l_3 + l_4 + l_5) + A_3(l_1 + l_2 + l_4 + l_5) + A_4(l_1 + l_2 + l_3 + l_5) + A_5(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)];$$

$$b_4^{\circ} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5, \quad a_0^{\circ} = -l_1l_2l_3l_4l_5;$$

$$a_1^{\circ} = l_1l_2l_3l_4 + l_1l_2l_3l_5 + l_1l_2l_4l_5 + l_1l_3l_4l_5 + l_2l_3l_4l_5;$$

$$a_2^{\circ} = -l_1l_2l_3 - l_1l_2l_4 - l_1l_2l_5 - l_1l_3l_4 - l_1l_3l_5 - l_1l_4l_5 - l_2l_3l_4 - l_2l_3l_5 - l_2l_4l_5 - l_3l_4l_5;$$

$$a_3^{\circ} = l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_2l_3 + l_2l_4 + l_2l_5 + l_3l_4 + l_3l_5 + l_4l_5,$$

$$a_4^{\circ} = -(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5), \quad a_5^{\circ} = 1.$$

Блок мікроЕОМ вносить суттєве запізнення в роботу апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1. Будемо вважати, що дискретний час запізнення апаратних засобів за вхідним сигналом становить  $T_0$ . Цей час дорівнює запізненню блоку мікроЕОМ, відповідно порядок математичної моделі становить  $d = 2$ . Із урахуванням цього запізнення дискретна передавальна функція апаратних засобів вийшла у такому вигляді

$$W_{11}(z) = \frac{b_4^{\circ}z^4 + b_3^{\circ}z^3 + b_2^{\circ}z^2 + b_1^{\circ}z + b_0^{\circ}}{a_5^{\circ}z^5 + a_4^{\circ}z^4 + a_3^{\circ}z^3 + a_2^{\circ}z^2 + a_1^{\circ}z + a_0^{\circ}}. \quad (14)$$

Після підстановки коефіцієнтів поліномів у останній вираз та математичних перетворень отримаємо дискретну передавальну функцію апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 у такому вигляді

$$W_{12}(z) = \frac{4.3 \cdot 10^{-5}z^4 - 1.6 \cdot 10^{-4}z^3 + 1.09 \cdot 10^{-4}z^2 - 2.69 \cdot 10^{-5}z}{z^5 - 4.20z^4 + 7.02z^3 - 5.82z^2 + 2.39z - 0.39}.$$

На основі цього виразу зібрано схему комп'ютерного моделювання процесу опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 (рис. 8).

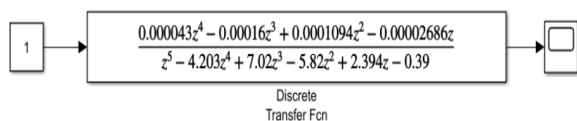


Рис. 8 - Схема комп'ютерного моделювання

У результаті комп'ютерного моделювання у програмному середовищі Matlab отримано вихідний сигнал апаратних засобів моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 (рис. 9).

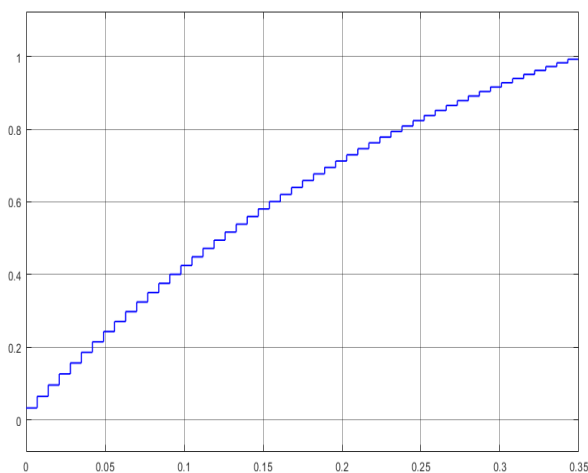


Рис. 9 - Результати комп'ютерного моделювання

### Обговорення результатів

Час опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу апаратними засобами склав 0.33 с, що задовольняє вимогам КС за швидкістю перетворення. Вигляд вхідного сигналу схеми комп'ютерного моделювання – аперіодичний. Порівняння графіків рис. 3 та рис. 9 свідчить, що перехід до дискретної передавальної функції виконано достатньо коректно.

### Висновки

На основі принципу керування зі зворотнім зв'язком за станом сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу розроблено КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1 за умов неповної інформації. Розроблено інформаційну технологію опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу силового агрегату.

Використано математичний апарат перетворення Лапласа для побудови математичних моделей компонент апаратних засобів. На основі методу структурних перетворень отримано передавальну функцію КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші.

Розроблено методику досліджень частотних характеристик апаратних засобів КС із використанням можливостей програмного середовища Matlab. Отримано перехідну функцію математичної моделі апаратних засобів керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1, імпульсну перехідну функцію, частотний годограф Найквіста та встановлено запас стійкості системи за амплітудою та фазою. Встановлено, що частотні характеристики апаратних засобів КС мають необхідні динамічні властивості.

Отримано дискретну передавальну функцію КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1. У програмному середовищі Matlab із розширенням побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу. У результаті аналізування її вихідного сигналу встановлено, що апаратні засоби керування процесами подачі паливно-повітряної суміші відповідають вимогам щодо невизначеності та швидкодії перетворення інформації.

### Список літератури

1. Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1999. 682 p.
2. Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. Vol. 2(3). P. 433–441.
3. Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3. No. 6. P. 782–787.
4. Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. *Measurement techniques USSR*. 1988. Vol. 31. Iss. 9. P. 868–871. doi: 10.1007/BF00863884.
5. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Черняев Д. В. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого валу дизеля. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 1(43). С. 113–118.
6. Грачев В. В. Экспериментальная оценка метода диагностирования дизельных двигателей по неравномерности вращения коленчатого вала. *Прогрессивные процессы технологической эксплуатации автомобилей. МАДИ*. Москва: 1982. С. 46–50.
7. Anetor L., Osakue E., Odetunde Ch. Combustion Dynamics at the Top Dead Center Position of a Spark Ignition Engine. *FME Transactions*. 2017. Vol. 45. No 4. P. 548–558. doi: 10.5937/fmet1704548A.
8. Gritsenko A., Shepelev V., Zadorozhnaya E., Almetova Z., Burzel A. The Advancement of Methods of Vibro-Acoustic Control of ICE Gas Distribution Mechanism. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 1. P. 127–136. doi: 10.5937/fmet2001127G.
9. Salinic S., Vranic A., Nestic N., Tomovic A. On the Torque Transmission by a Cardan-Hooke Joint. *FME Transactions*.

2017. Vol. 45. No 1. P. 117–121. doi: 10.5937/fmet1701117S.
- Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley: Prentice Hall, 2010. 1104 p.
  - Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No. 4. P. 85–91. doi:10.15407/techned2019.04.085.
  - Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*. 2020. Mol. 63. Iss. 11. P. 149–158.
  - Дьяконов В. П. *Matlab u Simulink dlya radioinzhenerov*. Москва: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
  - Дьяконов В. П. *Mathcad 8-12 dlya studentov*. Москва: СОЛОН-Пресс, 2010. 632 с.
  - Лазарев Ю. П. *Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс*. Киев: Изд. группа BHV, 2005. 512 с.
  - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2013. Iss. 1(43), pp. 113–118.
  - Grachev V. V. Eksperimental'naya otsenka metoda diagnostirovaniya dizel'nykh dvigateley po neravnomernosti vrashcheniya kolenchatogo vala [Experimental evaluation of the method for diagnosing diesel engines by uneven rotation of the crankshaft]. *Progressivnyye protsessy tekhnologicheskoy ekspluatatsii avtomobiley. MADI [Progressive processes of technological operation of cars]*. Moscow, 1982, pp. 46–50.
  - Anetor L., Osakue E., Odetunde Ch. Combustion Dynamics at the Top Dead Center Position of a Spark Ignition Engine. *FME Transactions*, 2017, Vol. 45, no 4, pp. 548–558, doi: 10.5937/fmet1704548A.
  - Gritsenko A., Shepelev V., Zadorozhnaya E., Almetova Z., Burzev A. The Advancement of Methods of Vibro-Acoustic Control of ICE Gas Distribution Mechanism. *FME Transactions*, 2020, Vol. 48, no 1, pp. 127–136, doi: 10.5937/fmet2001127G.
  - Salinic S., Vranic A., Nestic N., Tomovic A. On the Torque Transmission by a Cardan-Hooke Joint. *FME Transactions*, 2017, Vol. 45, no 1, pp. 117–121, doi:10.5937/fmet1701117S.
  - Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley: Prentice Hall, 2010, 1104 p.
  - Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2019, no 4, pp. 85–91, doi: 10.15407/techned2019.04.085.
  - Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*, 2020, Vol. 63, Iss. 11, pp. 149–158.
  - D'yakonov V. P. *Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov [Matlab and Simulink for Radio Engineers]*. Moscow, 2011, 976 p.
  - D'yakonov V. P. *Mathcad 8-12 dlya studentov [Mathcad 8-12 for students]*. Moscow, 2010, 632 p.
  - Lazarev Yu. P. *Modelirovaniye protsessov i sistem v Matlab: Uchebnyy kurs [Modeling Processes and Systems in Matlab: Tutorial]*. Kyiv, 2005, 512 p.

#### References (transliterated)

- Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1999, 682 p.
- Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, Vol. 2(3). pp. 433–441.
- Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*, 2009, Vol. 3, no. 6, pp. 782–787.
- Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. *Measurement techniques USSR*, 1988, Vol. 31, Iss.9, pp. 868–871, doi: 10.1007/BF00863884.
- Bodnar B. Ye., Ochkasov O. B., Chernyayev D. V. Vyznachennya metodu fil'tratsiyi syhnalu nerivnomirnosti chastoty obertannya kolinchastoho valu dyzelya [Determination of the method of filtering the signal of non-uniformity of the crankshaft speed of the diesel engine].

#### Відомості про авторів (About authors)

**Борисенко Анатолій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**Borysenko Anatoliy** – doctor of technical sciences, professor, department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: IvLV@mail.ua.

**Енікеєв Олександр Фанілович** – доктор технічних наук, доцент, кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: Al\_enikeev@bigmir.net

**Yenikieiev Oleksandr** – doctor of technical sciences, docent, department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: Al\_enikeev@bigmir.net

**Захаренков Дмитро Юрійович** – кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

**Zakharenkov Dmitry** – department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

**Зиков Ігор Семенович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zikov@gmail.com

**Zykov Ihor** – candidate of technical sciences, associate professor, department of computer engineering and programming, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zykov@gmail.com

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Борисенко А. М., Єнікєєв О. Ф., Захаренков Д. Ю., Зыков И. С. Аналізування частотних характеристик системи керування процесами подачі палива у циліндри силового агрегату. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 9-16. doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.02.

*Please cite this article as:*

Borysenko A., Yenikieiev O., Zakharenkov D., Zykov I. Analysis of the frequency characteristics of the control system for the processes of fuel supply to the cylinders of the power unit. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 9-16, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Борисенко А. Н., Еникеев А. Ф., Захаренков Д. Ю., Зыков И. С. Анализ частотных характеристик системы управления процессами подачи топлива в цилиндры силового агрегата. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 9-16. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02.

**АННОТАЦІЯ** Предложено идею мониторинга идентичности цилиндрических мощностей у двигателя внутреннего сгорания в условиях неполной информации и на ее основе построена компьютерная система. В качестве входной информации использован сигнал мгновенной скорости вращения коленчатого вала силового агрегата. При разработке архитектуры аппаратных средств использованы форсунки с пьезоэлектрическими исполнительными механизмами, принцип непосредственного цифрового управления, а также принцип управления с обратной связью по состоянию флуктуаций скорости вращения коленчатого вала. В качестве математического аппарата при анализе структурной схемы компьютерной системы программного управления процессами подачи топлива и воздуха в цилиндры силового агрегата использовано преобразование Лапласа. Построены математические модели компонент аппаратных средств управления процессами подачи топливовоздушной смеси и в результате анализа структурной схемы компьютерной системы получена передаточная функция. С использованием возможностей программной среды Matlab получены переходная и импульсная переходная характеристики системы, построен годограф Найквиста и установлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики аппаратных средств. Установлено, что частотные характеристики математической модели компьютерной системы обладают необходимыми динамическими характеристиками. Методом разложения на простые дроби получено выражение дискретной передаточной функции, коэффициенты степенных полиномов которой установлены с помощью метода определителей и вычислительных возможностей программной среды Mathcad. На основе дискретной передаточной функции построена схема компьютерного моделирования процесса обработки аппаратными средствами сигнала мгновенной скорости вращения коленчатого вала. Компьютерным моделированием получен выходной сигнал, в результате анализа которого установлено быстроедействие аппаратных средств обработки входной информации.

**Ключевые слова:** аппаратные средства; сигнал флуктуаций; частотные характеристики; быстроедействие; математическое и компьютерное моделирование

Надійшла (received) 08.11.2021