

УДК 621.324.57

Александров Є.Є., Александрова Т.Є., Костяник І.В.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАВАННЯ В ЕНЕРГОБЛОЦІ МІНІЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДГУ-315

**1. Постановка задачі.** В Україні мініелектростанції випускаються Державним підприємством «Завод імені Малишева» на основі серійних танкових двигунів 5ТДФ (ДГУ-200 потужністю 200 кВт) і 6ТД-1 (ДГУ-315 потужністю 315 кВт), підвищений ресурс яких забезпечується дефорсуванням базових двигунів за рівнем потужності. Ці електростанції випускаються як в стаціонарному, так і в рухомому варіантах і знаходять широке застосування для енергопостачання знеструмлених внаслідок стихійного лиха населених пунктів, установ, медичних закладів та харчових під-

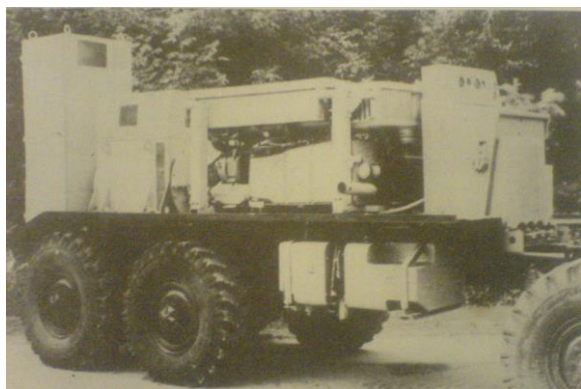


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд рухомого варіанту мініелектростанції ДГУ-315

приємств, а також для забезпечення електроенергією геолого-розвідувальних робіт.

На рис. 1 приведений зовнішній вигляд рухомого варіанту мініелектростанції ДГУ-315, а на рис. 2 – схема цифрового електрогідравлічного регулятора паливоподавання дизеля 6ТД-1 [1]. Дизель 6ТД-1 містить індукційні датчики кутової швидкості колінчастого валу і положення рейки паливного насосу. Зміна електричного навантаження з боку споживачів електричної енергії приводить до зміни моменту на валу ротора синхронного генератора і механічно з'єданого з ним колінчастого валу, що, в свою чергу, приводить до зміни кутової швидкості

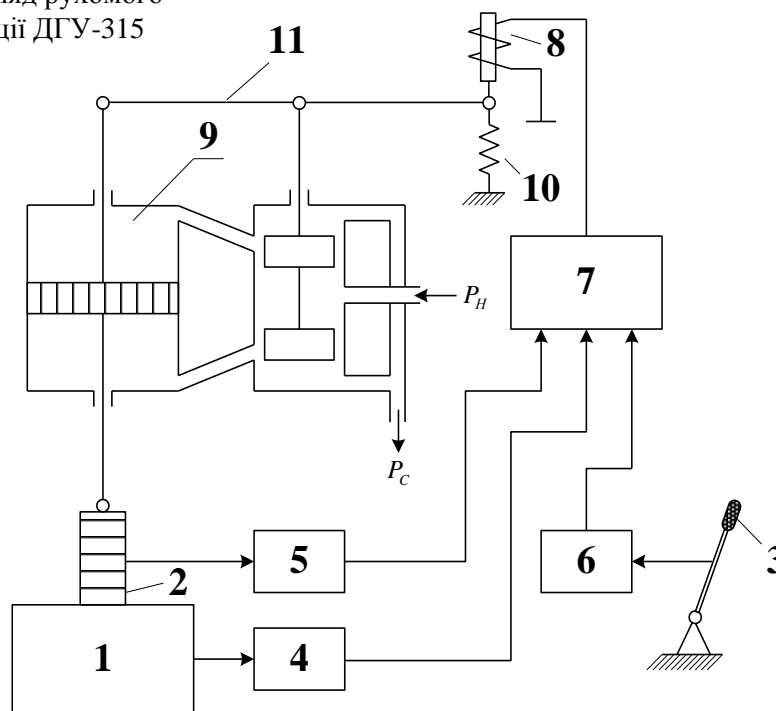


Рисунок 2 – Електрогідравлічний регулятор паливоподавання дизеля 6ТД-1: 1 – дизель; 2 – рейка паливного насоса; 3 – важіль настройки; 4 – індукційний датчик кутової швидкості обертання колінчастого валу; 5 – індукційний датчик положення рейки паливного насоса; 6 – датчик важеля настройки; 7 – електронний блок; 8 – електромагніт; 9 – серво-мотор; 10 – фіксуюча пружина

обертання колінчастого валу. При цьому електронний блок 7 виробляє сигнал керування, що подається до обмотки електромагніту 8, якор якого переміщує важіль 11 сервомотору 9. Переміщення поршня паливного сервомотору 9 приводить до відповідного переміщення рейки паливного насосу 2, що викликає зміну активного моменту на колінчастому валу, яка компенсує збурюючу зміну моменту навантаження з боку ротора синхронного генератора. Для покращення динамічних властивостей процесу паливоподавання регулятор охоплений від'ємним зворотнім зв'язком по переміщенню рейки паливного насосу за допомогою датчика 5. При постійному положенні важеля 3 і при постійному навантаженні на колінчастому валу дизеля 1 мініелектростанція працює в сталому режимі. При зміні електричного навантаження в системі відхилення сигналу керування на виході електронного блоку 7 складає

$$\Delta u(t) = k_{\omega} \cdot \Delta \omega(t) + k_h \cdot \Delta h(t), \quad (1)$$

де  $\Delta \omega(t)$ ,  $\Delta h(t)$  – відхилення кутової швидкості колінчастого валу енергоблоку і переміщення рейки паливного насосу від їх значень у сталому режимі.

Метою цієї роботи являється визначення значень коефіцієнтів підсилення  $k_{\omega}$  і  $k_h$ , що забезпечують необхідні динамічні характеристики процесу паливоподавання в енергоблосі мініелектростанції ДГУ-315.

**2. Математична модель дизеля 6ТД-1 як об'єкту керування.** Запишемо рівняння динамічної рівноваги дизеля [2]

$$I_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} = M_D[\omega(t), h(t)] - M_H[\omega(t), t], \quad (2)$$

де активний момент  $M_D[\omega(t), h(t)]$  деформованого дизеля 6ТД-1 дорівнює

$$M_D[\omega(t), h(t)] = -0,76 \cdot 10^5 [h(t - \tau) - 0,024] \times \\ \times [1 + 0,33 \cdot 10^{-2} \omega(t) - 0,11 \cdot 10^{-4} \omega^2(t)]. \quad (3)$$

Скориставшись результатами роботи [2], рівняння збуреного руху дизеля подано у вигляді

$$\frac{d\Delta \omega(t)}{dt} = -\frac{F_{до}}{I_{\Sigma}} \Delta \omega(t) + \frac{1}{I_{\Sigma}} \Delta M_D(t) + \frac{1}{2! I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^2 M_D}{\partial \omega^2} \right)_0 \Delta \omega^2(t) + \\ + \frac{1}{2! I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^2 M_D}{\partial \omega \partial h} \right)_0 \left( \frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0^{-1} \Delta \omega(t) \Delta M_D(t) + \\ + \frac{1}{3! I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^3 M_D}{\partial \omega^2 \partial h} \right)_0 \left( \frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0^{-1} \Delta \omega^2(t) \Delta M_D(t) - \frac{1}{I_{\Sigma}} \Delta M_H(t). \quad (4)$$

Зв'язок між функціями  $\Delta M_D(t)$  і  $\Delta h(t)$  запишемо у відповідності до роботи [2] у вигляді диференціального рівняння другого порядку

$$T_{\tau}^2 \frac{d^2 \Delta M_{Д}(t)}{dt^2} + 2T_{\tau} \frac{d \Delta M_{Д}(t)}{dt} + \Delta M_{Д}(t) = \left( \frac{\partial M_{Д}}{\partial h} \right)_0 \Delta h(t), \quad (5)$$

де постійна часу  $T_{\tau}$  дорівнює

$$T_{\tau} = \frac{2\pi}{l\omega_0}, \quad (6)$$

а через  $l$  позначена кількість циліндрів дизеля (для дизеля 6ТД-1  $l=6$ ).

Користуючись формулами (3) і (6), а також враховуючи, що  $I_{\Sigma} = 4,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ , обчислено коефіцієнти диференціальних рівнянь (4) і (5):

$$\begin{aligned} \frac{F_{Д0}}{I_{\Sigma}} &= 0,39 \text{ с}^{-1}; & \frac{1}{I_{\Sigma}} &= 0,204 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}; & T_{\tau} &= 0,33 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\ \frac{1}{2!I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^2 M_{Д}}{\partial \omega^2} \right)_0 &= -1,23 \cdot 10^{-3}; & \left( \frac{\partial M_{Д}}{\partial h} \right)_0 &= -0,73 \cdot 10^5 \text{ Н}; \\ \frac{1}{2!I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^2 M_{Д}}{\partial \omega \partial h} \right)_0 \left( \frac{\partial M_{Д}}{\partial h} \right)_0^{-1} &= -0,46 \cdot 10^{-3} \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}; \\ \frac{1}{3!I_{\Sigma}} \left( \frac{\partial^3 M_{Д}}{\partial \omega^2 \partial h} \right)_0 \left( \frac{\partial M_{Д}}{\partial h} \right)_0^{-1} &= -0,94 \cdot 10^{-6} \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}. \end{aligned}$$

Тоді рівняння (4) і (5) приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d \Delta \omega(t)}{dt} &= -0,39 \Delta \omega(t) + 0,204 \Delta M_{Д}(t) - 1,23 \cdot 10^{-3} \Delta \omega^2(t) - \\ &- 0,46 \cdot 10^{-3} \Delta \omega(t) \Delta M_{Д}(t) - 0,94 \cdot 10^{-6} \Delta \omega^2(t) \Delta M_{Д}(t) - 0,204 \Delta M_{H}(t); \quad (7) \\ 0,11 \cdot 10^{-4} \frac{d^2 \Delta M_{Д}(t)}{dt^2} &+ 0,66 \cdot 10^{-2} \frac{d \Delta M_{Д}(t)}{dt} + \Delta M_{Д}(t) = -0,73 \cdot 10^5 \Delta h(t). \end{aligned}$$

**3. Математична модель регулятора паливopодавання.** Диференціальні рівняння, що описують збудований рух електромагніту, записуються [4]

$$\begin{aligned} L_y \frac{d \Delta i_y(t)}{dt} + r_y \Delta i_y(t) &= \Delta u(t); \\ m \frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + f \frac{d \Delta y(t)}{dt} + c \Delta y(t) &= k_M \Delta i_y(t), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $i_y(t)$  – електричний струм в обмотці електромагніту;  $y(t)$  – переміщення якоря електромагніту;  $L_y$  – індуктивність обмотки;  $r_y$  – активний опір обмотки;  $m$  – приведена до рейки маса рухомих частин системи паливopодавання;  $f$  – коефіцієнт демпфування системи паливopодавання;  $c$  – коефіцієнт жорсткості пружного елемента електромагніту.

Рівняння збуреного руху паливного сервомотору має вигляд

$$T_h \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = \Delta y(t), \quad (9)$$

Рівняння (8) подамо у вигляді

$$\frac{L_y}{r_y} \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + \Delta i_y(t) = \frac{1}{r_y} \Delta u(t); \quad (10)$$

$$\frac{m}{c} \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} + \frac{f}{c} \frac{d\Delta y(t)}{dt} + \Delta y(t) = \frac{k_M}{c} \Delta i_y(t). \quad (11)$$

Введемо позначення

$$\frac{L_y}{r_y} = T_y; \quad \frac{1}{r_y} = k_y; \quad \frac{m}{c} = T_{я1}^2; \quad \frac{f}{c} = T_{я2}; \quad \frac{k_M}{c} = k_{я}.$$

Враховуючи, що [4]

$$L_y = 0,01 \text{ Гн}; \quad r_y = 100 \text{ Ом}; \quad m = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2; \\ f = 0,55 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}; \quad c = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}; \quad k_M = 100 \text{ Н} \cdot \text{А}^{-1},$$

отримуємо значення постійних часу і коефіцієнтів посилення електромагніту

$$T_y = 10^{-4} \text{ с}; \quad k_y = 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}; \quad T_{я1}^2 = 10^{-4} \text{ с}; \\ T_{я2} = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_{я} = 1 \text{ м} \cdot \text{А}^{-1}; \quad T_h = 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ с}.$$

З урахуванням формул (7), (8) і (9), запишемо диференціальні рівняння збуреного руху замкненої системи керування енергоблоком мініелектростанції ДГУ-315:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} = & -0,39\Delta\omega(t) + 0,204\Delta M_{Д}(t) - \\ & -1,23 \cdot 10^{-3} \Delta\omega^2(t) - 0,46 \cdot 10^{-3} \Delta\omega(t) \Delta M_{Д}(t) - \\ & -0,94 \cdot 10^{-6} \Delta\omega^2(t) \Delta M_{Д}(t) - 0,204\Delta M_{H}(t); \\ 0,11 \cdot 10^{-4} \frac{d^2\Delta M_{Д}(t)}{dt^2} + & 0,66 \cdot 10^{-2} \frac{d\Delta M_{Д}(t)}{dt} + \Delta M_{Д}(t) = -0,73 \cdot 10^5 \Delta h(t); \quad (12) \\ 10^{-4} \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + \Delta i_y(t) = & 10^{-2} [k_{\omega} \Delta\omega(t) + k_h \Delta h(t)]; \\ 10^{-4} \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} + 0,55 \cdot 10^{-2} \frac{d\Delta y(t)}{dt} + & \Delta y(t) = \Delta i_y(t); \\ 0,5 \cdot 10^{-1} \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = & \Delta y(t). \end{aligned}$$

Система першого наближення, що відповідає нелінійній системі (12), записується у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} &= -0,39\Delta\omega(t) + 0,204\Delta M_D(t) - 0,204\Delta M_H(t); \\ \frac{d^2\Delta M_D(t)}{dt^2} &= -0,91 \cdot 10^5 \Delta M_D(t) - 0,6 \cdot 10^3 \frac{d\Delta M_D(t)}{dt} - 0,66 \cdot 10^{10} \Delta h(t); \\ \frac{d\Delta i_y(t)}{dt^2} &= -10^4 \Delta i_y(t) + 10^2 [k_\omega \Delta\omega(t) + k_h \Delta h(t)]; \\ \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} &= -10^4 \Delta y(t) - 0,55 \cdot 10^2 \frac{d\Delta y(t)}{dt} + 10^4 \Delta i_y(t); \\ \frac{d\Delta h(t)}{dt} &= -200 \cdot \Delta h(t) + 200 \cdot \Delta y(t). \end{aligned} \quad (13)$$

**4. Характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання.** Для отримання характеристичного рівняння будемо розглядати замкнену систему паливоподавання у вигляді наступної структурної схеми, що подана на рис.3.

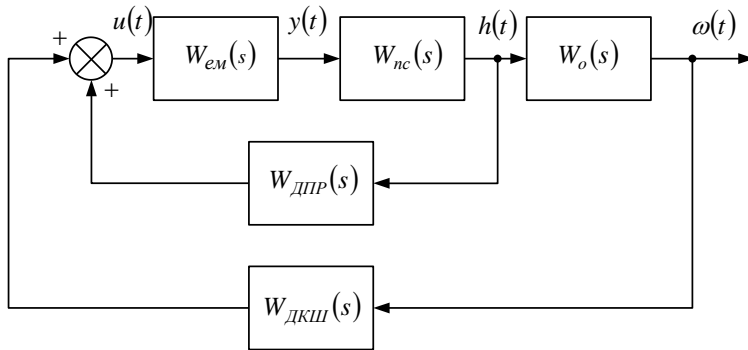


Рисунок 3 – Структурна схема замкненої системи паливоподавання енергоблоку БТД-1 мініелектростанції ДГУ-315

На рис.3. прийняті позначення:  $W_{ем}(s)$  – передавальна функція електромагніта;  $W_{нс}(s)$  – передавальна функція паливного сервомотора;  $W_{о}(s)$  – передавальна функція об'єкту керування;  $W_{ДПР}(s)$  – передавальна функція датчика положення рейки паливного насоса;  $W_{ДКШ}(s)$  – передавальна функція датчика кутової швидкості колінчастого валу.

З системи диференціальних рівнянь (13) маємо

$$\begin{aligned} W_o(s) &= -\frac{0,46 \cdot 10^5}{(2,56s + 1)(0,11 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,66 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{ем}(s) &= \frac{10^{-2}}{(10^{-4} s + 1)(10^{-4} s^2 + 0,55 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{нс}(s) &= \frac{1}{(0,5 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{ДПР}(s) &= k_h; \quad W_{ДКШ}(s) = k_\omega. \end{aligned} \quad (14)$$

Передавальна функція внутрішнього замкненого контуру структурної схеми записується у вигляді

$$W_g(s) = \frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}, \quad (15)$$

а передавальна функція зовнішнього замкненого контуру – у вигляді

$$W_3(s) = \frac{W_g(s) \cdot W_o(s)}{1 - W_g(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s)}. \quad (16)$$

Підставимо (15) в (16)

$$W_3(s) = \frac{\frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}}{1 - \frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}}}. \quad (17)$$

В результаті отримуємо характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання

$$1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s) - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s) = 0 \quad (18)$$

У рівнянні (18) підставимо співвідношення (14). В результаті отримуємо характеристичне рівняння у вигляді:

$$\begin{aligned} &0,14 \cdot 10^{-14} \cdot s^7 + 0,151 \cdot 10^{-10} \cdot s^6 + 0,122 \cdot 10^{-7} \cdot s^5 + 0,377 \cdot 10^{-5} \cdot s^4 + \\ &+ (0,538 \cdot 10^{-3} + 0,28 \cdot 10^{-6} k_h) \cdot s^3 + (0,442 \cdot 10^{-1} + 0,169 \cdot 10^{-3} k_h) \cdot s^2 + \\ &+ (2,58 + 0,257 \cdot 10^{-1} k_h) \cdot s + 1 + 10^{-2} k_h - 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_\omega = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

**5. Моделювання динамічних процесів в замкненій системі паливоподавання.** У характеристичному рівнянні (19) покладемо  $s = j \cdot \omega$ , виділимо дійсну та уявну частини і дорівняємо їх нулю:

$$\begin{aligned} X(\omega, k_\omega, k_h) &= 1 + 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_\omega - (10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) k_h - 0,442 \cdot 10^{-1} \omega^2 + \\ &+ 0,377 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 0,151 \cdot 10^{-10} \omega^6 = 0; \\ Y(\omega, k_\omega, k_h) &= -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) k_h + 2,58 \omega - 0,538 \cdot 10^{-3} \omega^3 + \\ &+ 0,122 \cdot 10^{-7} \omega^5 - 0,14 \cdot 10^{-14} \omega^7 = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Із співвідношень (20) запишемо рівняння:

$$\begin{aligned}
 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_{\omega} - (10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) k_h &= -1 + 0,442 \cdot 10^{-1} \omega^2 - \\
 &- 0,377 \cdot 10^{-5} \omega^4 + 0,151 \cdot 10^{-10} \omega^6; \\
 -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) k_h &= -2,58 \omega + 0,538 \cdot 10^{-3} \omega^3 - \\
 &- 0,122 \cdot 10^{-7} \omega^5 + 0,14 \cdot 10^{-14} \omega^7 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

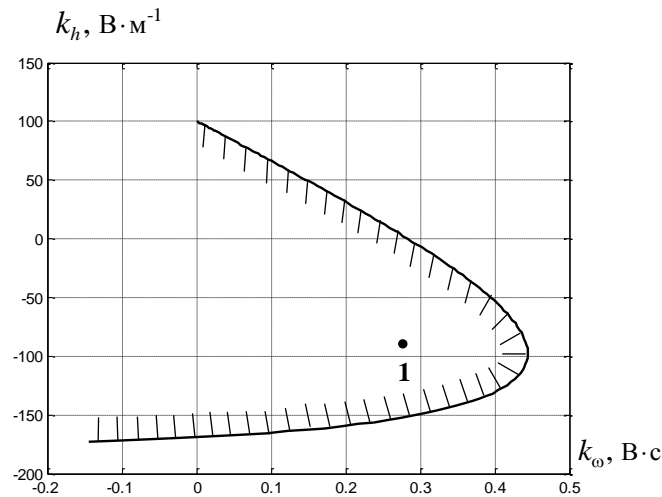


Рисунок 4 – Область стійкості замкненої системи паливоподавання дизеля БТД-1 в площині варійованих параметрів регулятора

Використовуючи рівняння (21) побудуємо в площині  $(k_{\omega}, k_h)$  межу області стійкості, що представлена на рис. 4.

Для визначення області стійкості розглянемо визначник

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \begin{vmatrix} \frac{\partial X(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_{\omega}} & \frac{\partial X(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_h} \\ \frac{\partial Y(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_{\omega}} & \frac{\partial Y(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_h} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,46 \cdot 10^3 & -(10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) \\ 0 & -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) \end{vmatrix} = \\
 &= -0,46 \cdot 10^3 (0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3).
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

При  $\omega < 958 \text{ с}^{-1}$  визначник (22) – від’ємний, тобто межу області стійкості треба штрихувати праворуч. Тоді штрих буде напрямлений усередину області стійкості.

Оберемо в області стійкості на рис.4 точку 1 з параметрами  $k_{\omega} = 0,276 \text{ В} \cdot \text{с}$ ,  $k_h = -81,7 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$  і побудуємо динамічні процеси в замкненій системі паливоподавання шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь (12) при початкових умовах  $\Delta\omega(0) = 10 \text{ с}^{-1}$ ;  $\Delta M_D(0) = \Delta \dot{M}_D(0) = \Delta i_y(0) = \Delta y(0) = \Delta \dot{y}(0) = \Delta h(0) = 0$ .

Ці процеси приведені на рис. 5. Час затухання цих процесів, тобто час, після якого має місце нерівність

$$\Delta\omega(t) < 0,05 \Delta\omega(0) = 0,5 \text{ с}^{-1},$$

складає 0,25 с, тобто швидкодія системи паливоподавання з електронним регулятором майже удвічі вище, ніж швидкодія системи з гідромеханічним регулятором [2].

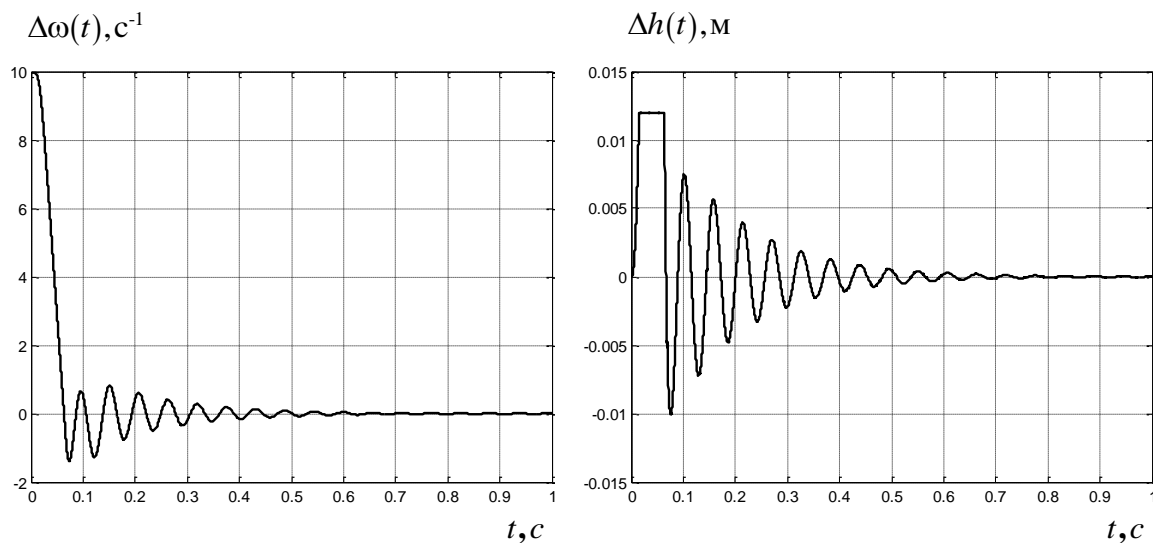


Рисунок 5 – Перехідні процеси в замкненій системі паливоподавання при  $k_{\omega}^* = 0,276 \text{ В} \cdot \text{с}$ ,  $k_h^* = -81,7 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ .

#### Література

1. Рязанцев Н.К., Бородин Ю.С., Синельникова Л.Б. Улучшение топливной экономичности и эксплуатационных характеристик транспортных двигателей путем разработки электронных систем управления// Вестник НТУ «ХПИ», 2001.–вып.7.–с.183–192.
2. Александрова Т.Є., Костяник І.В. Математичне моделювання процесу паливоподавання в енергоблоці мініелектростанції ДГУ-200. //Механіка та машинобудування. – №1. – 2009. – с. 121–129.
3. Кац А.М. Автоматическое регулирование скорости двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машгиз, 1956. – 302 с.
4. Аблесімов О.К., Александров Є.Є, Александрова І.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.3. Автоматичне керування озброєнням танків. – Харків: НТУ «ХПИ», 2008. – 444 с.

УДК 621.324.57

Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Костяник И.В.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ В ЭНЕРГОБЛОКЕ МИНИЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДГУ-315

Рассмотрена математическая модель процесса топливоподачи и переходные процессы в замкнутой системе автоматического управления топливоподачей энергоблока миниэлектростанции ДГУ-315.

Alexandrov Ye.Ye., Alexandrova T.Ye., Kostyanik I.V.

#### MODELLING OF FUEL SUPPLY PROCESS IN MINIPOWER STATION DGU-315 POWER UNIT

The mathematical model of fuel supply process and transients in the closed system of automatic control of fuel supply of minipower station DGU-315 power unit is considered.