

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ В  
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ**

**Навчально-методичний посібник  
до виконання розрахунково-графічної роботи  
для студентів спеціальності  
«Галузеве машинобудування»  
спеціалізацій  
«Транспортні засоби високої прохідності»  
та  
«Мехатронні системи транспортних засобів»**

Харків 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Т. Є. Александрова  
І. В. Костяник

**АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ В  
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ**

**Навчально-методичний посібник  
до виконання розрахунково-графічної роботи  
для студентів спеціальності  
«Галузеве машинобудування»  
спеціалізацій  
«Транспортні засоби високої прохідності»  
та  
«Мехатронні системи транспортних засобів»**

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 3 від 10.10.2018

Харків НТУ «ХПІ»  
2018

УДК 629:517.93

A46

Рецензенти:

*М. А. Ткачук*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

*О. Я. Ніконов*, д-р техн. наук, проф. кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

**Александрова Т. Є.**

A46 Автоматичне регулювання в транспортних засобах високої прохідності : навчально-методичний посібник до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування» спеціалізацій «Транспортні засоби високої прохідності» та «Мехатронні системи транспортних засобів» / Т. Є. Александрова, І. В. Костяник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 72 с.

Розглянуто математичні моделі систем автоматичного керування: систем автоматичної стабілізації балістичної ракети, систем паливоподавання двигуна внутрішнього згорання, систем наведення і стабілізації основного озброєння танка, а також їх параметричний синтез.

Призначено для магістрів спеціальностей «Галузеве машинобудування», «Інженерна механіка» та «Системний аналіз».

Іл. 6. Бібліогр. 11 назв.

© Т. Є. Александрова, І. В. Костяник

© НТУ «ХПІ» , 2018



## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	5
<b>Розділ 1. Опис систем керування рухомими об'єктами</b> .....	7
1.1 Система автоматичної стабілізації балістичної ракети-носія .....	7
1.2 Система автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля .....	9
1.3 Система наведення і стабілізації основного озброєння танка .....	12
<b>Розділ 2. Математичні моделі збуреного руху об'єктів керування</b> .....	15
2.1 Балістична ракета як об'єкт керування.....	15
2.2 Двигун внутрішнього згоряння як керуємий об'єкт .....	18
2.3 Основне озброєння танка як об'єкт керування.....	20
<b>Розділ 3. побудова областей стійкості замкнених систем автоматичного керування в просторі варійованих параметрів регулятора</b> .....	23
3.1 Побудова областей стійкості балістичної ракети-носія зі стабілізатором аналогового типу в площині варійованих коефіцієнтів підсилення.....	23
3.2 Визначення інтервалу стійкості коефіцієнту підсилення замкненої системи паливоподавання транспортного дизеля .....	28
3.3 Побудова області стійкості замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля .....	31
3.4 Побудова області стійкості замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати зі стабілізатором цифрового типу.....	34
<b>Розділ 4. параметричний синтез систем автоматичного керування</b> .....	41
4.1 Синтез замкнених систем автоматичного керування оптимальних за запасом стійкості та швидкодією .....	41

4.2 Синтез замкнених систем автоматичного керування оптимальних за точністю (інваріантних до дії зовнішніх збурень) .....	44
4.3 Розгляд перехідних процесів в замкнених системах автоматичного керування.....	45
теми розрахунково-графічних робіт .....	51
Порядок оформлення розрахунково-графічної роботи (РГР) .....	54
Список літератури.....	55
Додаток А .....	57

## ВСТУП

Пристрій, агрегат, машина або будь-яка система називаються автоматичними, якщо вони здійснюють свої основні функції, виключаючи безпосередню участь людини. У зв'язку з виникненням та розвитком автоматичних систем з'явилася і нова галузь науки, що займається їх вивченням – автоматика. Автоматика являє собою прикладну наукову дисципліну, яка вивчає принципи побудови та методи розрахунку автоматичних систем.

Значну частину автоматики становить теорія автоматичного керування, яка складається з двох основних розділів – аналіз систем автоматичного керування і синтез систем автоматичного керування. Аналіз систем автоматичного керування – це вивчення її властивостей; тут не створюється нова система, а досліджується задана. Поняття «синтез систем автоматичного керування» близьке за змістом до поняття «проектування». Різниця полягає в тому, що останнє означає весь процес розробки системи, а синтез характеризує частину цього процесу, коли створюється якийсь варіант, не обов'язково статичний. В процесі проектування задачі синтезу вирішуються неодноразово, перетинаючись із задачами аналізу. Синтез систем автоматичного керування направлений на створення нових варіантів, а аналіз використовується для їх оцінки.

В представленому навчально-методичному посібнику розглядаються найбільш розповсюджені системи автоматичного керування: система автоматичної стабілізації балістичної ракети, система паливоподавання двигуна внутрішнього згоряння, система наведення і стабілізації основного озброєння танка. Для перелічених систем розроблені математичні моделі збуреного руху об'єктів керування, побудовані області стійкості замкнених систем у просторі варійованих параметрів регуляторів, а також вирішені задачі параметричного синтезу замкнених систем автоматичного керування, які полягають у визначенні таких значень варійованих параметрів регуляторів,

що, окрім стійкості, забезпечують необхідну якість відповідної замкненої системи автоматичного керування, а саме запас стійкості, швидкодію, точність тощо.

Навчально-методичний посібник складається з чотирьох розділів. У першому розділі дається загальний опис систем керування рухомими об'єктами, а саме системи автоматичної стабілізації балістичної ракети, системи паливоподавання двигуна внутрішнього згоряння, системи наведення і стабілізації основного озброєння танка.

Другий розділ присвячений математичному моделюванню збуреного руху об'єктів керування для перелічених систем.

У третьому розділі наведені алгоритми побудови областей стійкості замкнених систем автоматичного керування в просторі варійованих параметрів регуляторів та їх реалізація в програмному пакеті MATLAB.

У четвертому розділі для перелічених систем розглянуто вирішення задач параметричного синтезу замкнених систем автоматичного керування, які полягають у визначенні таких значень варійованих параметрів регуляторів, що забезпечують необхідну стійкість та якість відповідної замкненої системи автоматичного керування.

# Розділ 1. ОПИС СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

## 1.1 Система автоматичної стабілізації балістичної ракети-носія

Розглянемо балістичну ракету [1], яка здійснює політ у заданому напрямку, що визначається осями нерухокої інерціальної системи координат  $OXY$  (рис.1). Рухома система координат  $O_n X_n Y_n$  переміщується разом з центром мас ракети, причому напрямки осей  $O_n X_n$  і  $O_n Y_n$  збігаються з напрямками відповідних осей інерціальної системи координат, а точка  $O_n$  знаходиться у центрі мас ракети. Вісі пов'язаної з ракетою системи координат  $O' X'$  і  $O' Y'$  збігаються з головними власними центральними осями інерції ракети. З аналізу рис. 1 можна зробити висновок, що збурений рух ракети характеризується узагальненими координатами  $y(t)$  і  $\psi(t)$  та узагальненими швидкостями  $\dot{y}(t)$  і  $\dot{\psi}(t)$ .

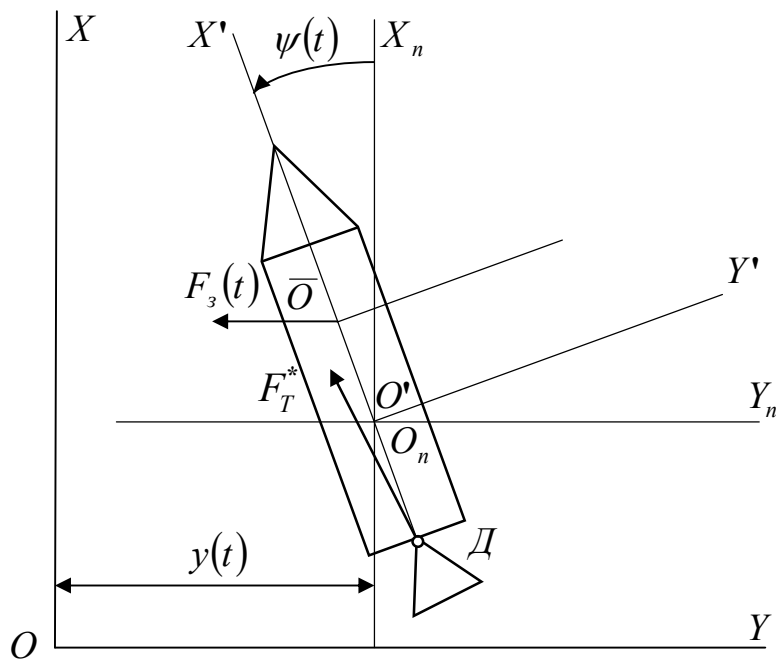


Рис. 1. До опису руху балістичної ракети відносно заданого напрямку

Рівняння збуреного руху абсолютно жорсткої твердопаливної ракети мають такий вигляд [1,2]

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) &= a'_{yy} \dot{y}(t) + a_{y\psi} \psi(t) + a_{y\delta} \delta(t); \\ \ddot{\psi}(t) &= a'_{\psi y} \dot{y}(t) + a_{\psi\psi} \psi(t) + a_{\psi\delta} \delta(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Система автоматичної стабілізації балістичної ракети містить два контури керування – контур керування за боковим зміщенням і контур керування за кутом відхилення. Структурна схема замкненої системи стабілізації балістичної ракети наведена на рис. 2, де прийняті такі позначення:  $W_o(s)$  – передавальна функція об'єкту стабілізації;  $W_{ac}^y(s)$  – передавальна функція контуру керування за боковим зміщенням;  $W_{ac}^\psi(s)$  – передавальна функція контуру керування за кутом відхилення. Обидва контури у сукупності ставлять автомат стабілізації АС, що реалізує закон або алгоритм стабілізації:

$$\delta(t) = k_y y(t) + k_{\dot{y}} \dot{y}(t) + k_\psi \psi(t) + k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}(t). \quad (2)$$

З розгляду формули (2) можна зробити висновок, що для отримання інформації про поточні узагальнені координати і узагальнені швидкості необхідно використання мінімум трьох датчиків – гіростабілізованої платформи для вимірювання кутового відхилення корпусу  $\psi(t)$ , гіроскопічного датчика кутової швидкості обертання корпусу  $\dot{\psi}(t)$  і датчика лінійних прискорень корпусу для вимірювання величини  $\dot{y}(t)$ .

Відповідно до алгоритму (2) передавальні функції контурів автомату стабілізації становлять:

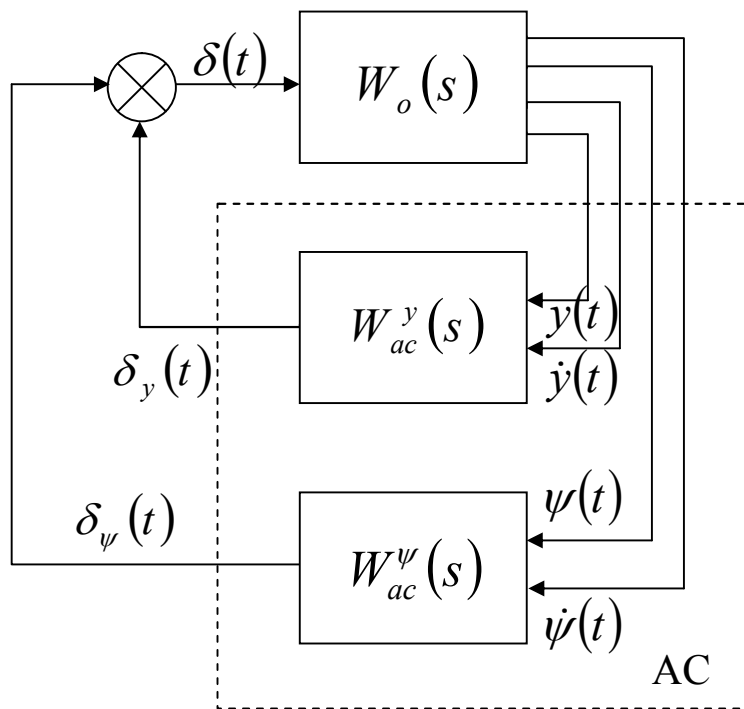


Рис. 2. Структурна схема замкненої системи стабілізації балістичної ракети

$$W_{ac}^y(s) = k_y + s \cdot k_{\dot{y}}, \quad (3)$$

$$W_{ac}^\psi(s) = k_\psi + s \cdot k_{\dot{\psi}}. \quad (4)$$

## 1.2 Система автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля

Структурна схема замкненої системи паливоподавання транспортних дизелів 5ТДФ, 6ТД і 3ТД [3] наведена на рис. 3, де прийняті такі позначення: 1 – транспортний дизель; 2 – рейка паливного насоса; 3 – педаль управління подачею палива; 4 – датчик кутової швидкості колінчастого вала; 5 – датчик положення рейки паливного насоса; 6 – датчик положення педалі

управління подачею палива; 7 – електронний блок регулятора; 8 – електромагніт; 9, 10 – гідравлічні підсилювачі; 11 – ланка диференціювання.

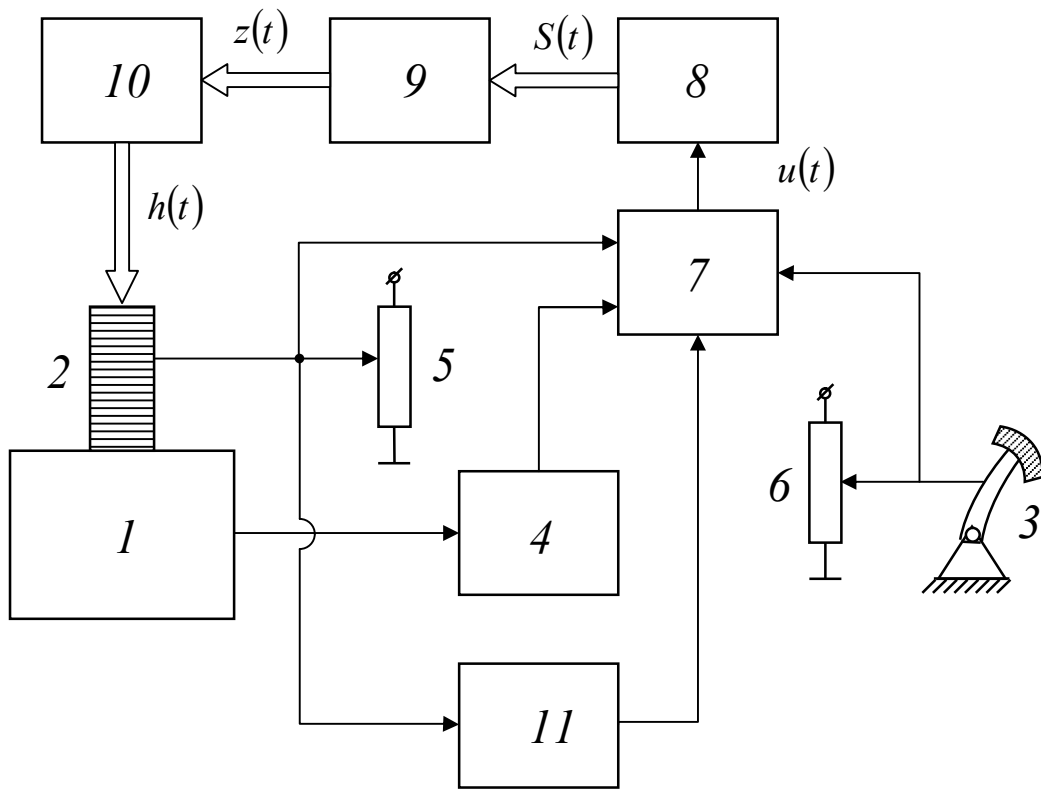


Рис. 3. Структурна схема замкненої системи паливopодавання транспортного дизеля

Об'єктом керування системи, що розглядається, є транспортний дизель  $1$  з органом подавання  $2$ ; задавальним пристроєм є педаль управління подачею палива  $3$ ; блок чутливих елементів складають датчики  $4$ ,  $5$  і  $6$ ; електронний блок  $7$  з ланкою диференціювання  $11$  складають підсилювально-перетворюючий пристрій, а сукупність електромагніту  $8$  та гідравлічних підсилювачів  $9$  та  $10$  утворюють виконавчий орган замкненої системи керування.

Датчики 4, 5 і 6 являються індукційними і фактично безінерційними, тому вихідний сигнал електронного блока 7 може бути записаний у вигляді

$$u(t) = k_{\omega}\omega(t) + k_h h(t) + k_{\alpha}\alpha(t), \quad (5)$$

не враховуючи наявності ланки диференціювання 11. У формулі (5) прийняті позначення:  $u(t)$  – вихідний сигнал електронного блоку;  $\omega(t)$  – кутова швидкість колінчастого валу;  $h(t)$  – положення рейки паливного насосу;  $\alpha(t)$  – положення педалі управління подачею палива;  $k_{\omega}$ ,  $k_h$ ,  $k_{\alpha}$  – коефіцієнти підсилення електронного блока.

Диференціальне рівняння збуреного руху електромагніта має вигляд [4]:

$$T_1^2 \ddot{S}(t) + T_2 \dot{S}(t) + S(t) = k_M u(t), \quad (6)$$

де  $S(t)$  – переміщення вихідного штоку електромагніта;  $T_1$ ,  $T_2$  – постійні часу електромагніта;  $k_M$  – коефіцієнт підсилення електромагніта.

Збурений рух двох послідовно з'єднаних гідравлічних підсилювачів описується системою диференціальних рівнянь [4]:

$$T_s \dot{z}(t) + z(t) = S(t); \quad (7)$$

$$T_h \dot{h}(t) + h(t) = k_z z(t), \quad (8)$$

де  $z(t)$  – переміщення вихідного штоку гідравлічного підсилювача 9;  $T_s$  і  $T_h$  – постійні часу гідропідсилювачів 9 і 10.

Відповідно до диференціальних рівнянь (6), (7) і (8) передавальні функції складових виконавчого органу дорівнюють:

$$W_M(s) = \frac{k_M}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}; \quad (9)$$

$$W_S(s) = \frac{1}{T_S s + 1}; \quad (10)$$

$$W_h(s) = \frac{k_z}{T_h s + 1}, \quad (11)$$

а передавальна функція виконавчого органу дорівнює

$$\begin{aligned} W_{BO}(s) &= W_M(s)W_S(s)W_h(s) = \\ &= \frac{k_M k_z}{(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)(T_S s + 1)(T_h s + 1)}. \end{aligned} \quad (12)$$

### 1.3 Система наведення і стабілізації основного озброєння танка

Структурна схема замкненої системи наведення і стабілізації основного озброєння танка (танкової гармати калібру 125 мм) у каналі вертикального наведення наведена на рис. 4, де прийняті такі позначення: 1 – пульт наведення; 2 – електромагніт наведення; 3 – гіроскопічний датчик кута; 4 – електронний блок керування; 5 – виконавчий орган (електрогідравлічний підсилювач); 6 – об'єкт керування (танкова гармата); 7 – гіроскопічний датчик кутової швидкості.

Нехтуючи власною динамікою гіроскопічних датчиків кута і кутової швидкості, будемо вважати, що вихідні сигнали датчиків становлять:

$$u_\varphi(t) = k_\Gamma \varphi(t); \quad (13)$$

$$u_{\omega\varphi}(t) = k_c \omega_\varphi(t), \quad (14)$$

де  $\varphi(t)$  – кут відхилення осі каналу ствола танкової гармати від лінії прицілювання;  $\omega_\varphi(t)$  – кутова швидкість обертання танкової гармати відносно осі цапф;  $k_\Gamma$ ,  $k_c$  – коефіцієнти підсилення гіроскопічних датчиків. При цьому  $\omega_\varphi(t) = \dot{\varphi}(t)$ .

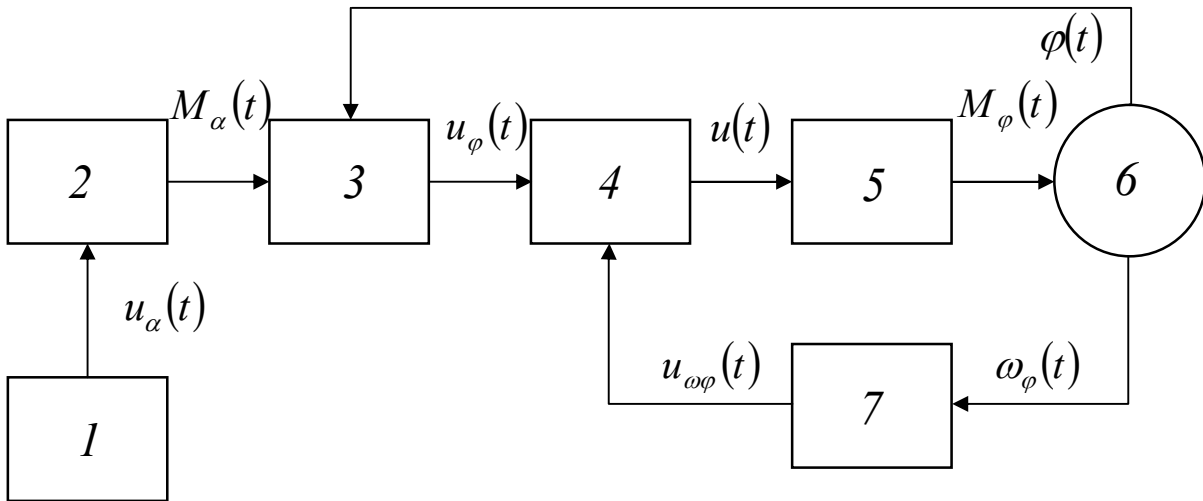


Рис. 4. Структурна схема замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати

Якщо електронний блок керування 4 побудовано на аналогових принципах, то закон стабілізації танкової гармати, що реалізується електронним блоком 4, записується у вигляді

$$u(t) = k_\varphi u_\varphi(t) + k_{\dot{\varphi}} u_{\omega\varphi}(t) = k_\varphi k_\Gamma \varphi(t) + k_{\dot{\varphi}} k_c \omega_\varphi(t). \quad (15)$$

Якщо електронний блок керування 4 побудований на цифрових принципах, то алгоритм наведення і стабілізації має вигляд

$$u[nT] = k_{\phi} k_{\Gamma} \phi[nT] + k_{\dot{\phi}} k_c \omega_{\phi}[nT], \quad (16)$$

де  $T$  – період квантування цифрового електронного блока.

Решітчаста функція (16) подається до входу перетворювача «код-аналог», з виходу якого безперервний сигнал  $u(t)$  подається до входу електрогідравлічного підсилювача 5, динаміка якого описується диференціальним рівнянням [5]:

$$I_K \ddot{\beta}(t) + f \dot{\beta}(t) + c \beta(t) = \frac{k_e}{r_y} u(t), \quad (17)$$

де  $\beta(t)$  – кут повороту коромисла електромагніта електрогідравлічного підсилювача;  $I_K$  – момент інерції коромисла відносно осі повороту;  $f$  – коефіцієнт гідравлічного тертя у вісі обертання коромисла;  $c$  – коефіцієнт жорсткості центруючої пружини коромисла;  $k_e$  – коефіцієнт підсилення електромагніта;  $r_y$  – опір керуючої обмотки електромагніта.

Розділимо обидві частини рівняння (17) на  $c$  і введемо позначення

$$\frac{I_K}{c} = T_1^2; \quad \frac{f}{c} = T_2,$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – постійні часу електрогідравлічного підсилювача. Тоді, з урахуванням співвідношень (15) і (17), передавальна функція стабілізатора танкової гармати записується у вигляді

$$W_a(s) = \frac{k_e (k_{\phi} k_{\Gamma} + k_{\dot{\phi}} k_c s)}{r_y c (T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)}. \quad (18)$$

## Розділ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗБУРЕНОГО РУХУ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

### 2.1 Балістична ракета як об'єкт керування

Математична модель збуреного руху балістичної твердопаливної ракети-носія має вигляд (1). Введемо у розгляд вектор стану ракети

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix}$$

і запишемо математичну модель об'єкта керування у нормальній формі Коші:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a'_{yy}x_2(t) + a_{y\psi}x_3(t) + a_{y\delta}\delta(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= a'_{\psi y}x_2(t) + a_{\psi\psi}x_3(t) + a_{\psi\delta}\delta(t). \end{aligned} \tag{19}$$

Систему диференціальних рівнянь (19) подамо у векторно-матричному вигляді:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot \delta(t). \tag{20}$$

Векторно-матричне диференціальне рівняння (20) запишемо в операційному вигляді:

$$EpX(t) = A \cdot X(t) + B \cdot \delta(t), \quad (21)$$

де відповідні матриці становлять:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{y\delta} \\ 0 \\ a_{\psi\delta} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a'_{yy} & a_{y\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a'_{\psi y} & a_{\psi\psi} & 0 \end{bmatrix}.$$

Перетворимо рівняння (21) за Лапласом:

$$E \cdot s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + B \cdot \Delta(s). \quad (22)$$

З рівняння (22) маємо

$$(A - Es)X(s) = -B \cdot \Delta(s)$$

або

$$X(s) = -(A - Es)^{-1} B \cdot \Delta(s), \quad (23)$$

де  $s$  – комплексна змінна перетворення Лапласа;  $X(s)$  – вектор-функція перетворення Лапласа вектор-функції часу  $X(t)$ ;  $\Delta(s)$  – перетворення Лапласа функції часу  $\delta(t)$ .

Матриця  $A - Es$  записується у вигляді

$$A - Es = \begin{bmatrix} -s & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a'_{yy} - s & a_{y\psi} & 0 \\ 0 & 0 & -s & 1 \\ 0 & a'_{\psi y} & a_{\psi\psi} & -s \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Зворотна матриця  $(A - Es)^{-1}$  обчислюється за формулою

$$(A - Es)^{-1} = \frac{1}{\mathbf{det}(A - Es)} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}^T, \quad (25)$$

де  $A_{ij}$  – алгебраїчне доповнення елемента матриці  $A - Es$ , розташованого в  $i$ -му рядку і  $j$ -му стовпці. Символ  $T$  у формулі (25) означає транспонування матриці.

З урахуванням формул (23) і (25) можна записати співвідношення:

$$\begin{aligned} x_1(s) &= -\frac{1}{\mathbf{det}(A - Es)} (A_{21}a_{y\delta} + A_{41}a_{\psi\delta})\Delta(s); \\ x_3(s) &= -\frac{1}{\mathbf{det}(A - Es)} (A_{23}a_{y\delta} + A_{43}a_{\psi\delta})\Delta(s), \end{aligned} \quad (26)$$

де відповідні алгебраїчні доповнення дорівнюють:

$$A_{21} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -s & 1 \\ a'_{\psi y} & a_{\psi\psi} & -s \end{vmatrix} = s^2 - a_{\psi\psi}; \quad (27)$$

$$A_{41} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a'_{yy} - s & a_{y\psi} & 0 \\ 0 & -s & 1 \end{vmatrix} = a_{y\psi}; \quad (28)$$

$$A_{23} = \begin{vmatrix} -s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a'_{\psi y} & -s \end{vmatrix} = a'_{\psi y}s; \quad (29)$$

$$A_{43} = \begin{vmatrix} -s & 1 & 0 \\ 0 & a'_{yy} - s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = s^2 - a'_{yy}s. \quad (30)$$

$$\mathbf{det}(A - Es) = s[s^3 - a'_{yy}s^2 - a_{\psi\psi}s + N], \quad (31)$$

де 
$$N = a_{\psi\psi} a'_{yy} - a'_{yy} a_{y\psi}. \quad (32)$$

З використанням співвідношень (26) запишемо формули для передавальних функцій ракети як об'єкта стабілізації в каналах бокового зсуву і ристання

$$W_o^y(s) = \frac{x_1(s)}{\Delta(s)} = -\frac{a_{y\delta}s^2 - M}{s[s^3 - a'_{yy}s^2 - a_{\psi\psi}s + N]}; \quad (33)$$

$$W_o^\psi(s) = \frac{x_3(s)}{\Delta(s)} = -\frac{a_{\psi\delta}s - P}{s^3 - a'_{yy}s^2 - a_{\psi\psi}s + N}, \quad (34)$$

де 
$$M = a_{\psi\psi} a_{y\delta} - a_{y\psi} a_{\psi\delta}; \quad (35)$$

$$P = a'_{yy} a_{\psi\delta} - a'_{yy} a_{y\delta}. \quad (36)$$

## 2.2 Двигун внутрішнього згорання як керований об'єкт

Застосовуючи принцип Даламбера, запишемо умову динамічної рівноваги колінчастого вала двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) [6]:

$$I_\Sigma \frac{d\omega(t)}{dt} = M_D[\omega(t), h(t)] - M_C[\omega(t), t], \quad (37)$$

де  $M_D[\omega(t), h(t)]$  – активний момент, що розвивається двигуном;  $M_C[\omega(t), t]$  – момент опору на колінчастому валу;  $I_\Sigma$  – приведений до колі-

нчастого вала момент інерції рухомих частин двигуна та пов'язаних з ним агрегатів транспортного засобу.

Сталий режим роботи двигуна характеризується рівновагою активно-го моменту і моменту опору, постійною швидкістю обертання  $\omega_0$  і постійним положенням рейки паливного насоса  $h_0$ . Отже, в сталому режимі виконується умова

$$M_D[\omega_0, h_0] = M_C[\omega_0]. \quad (38)$$

У загальному випадку функції  $M_D[\omega(t), h(t)]$  і  $M_C[\omega(t), t]$  нелінійні. Лінеаризація цих функцій шляхом розкладання у ряди Тейлора поблизу точки сталого режиму  $\omega_0, h_0$  та при відкиданні нелінійних членів розкладання приводить до співвідношень:

$$M_D[\omega(t), h(t)] = M_D[\omega_0, h_0] + \left( \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega(t) + \left( \frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0 \Delta h(t); \quad (39)$$

$$M_C[\omega(t), t] = M_C[\omega_0] + \left( \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega(t) + \Delta M_C(t). \quad (40)$$

З урахуванням співвідношень (38)–(40) рівняння (37) запишемо у вигляді

$$I_\Sigma \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} = \left[ \left( \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right)_0 \right] \Delta\omega(t) + \left( \frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0 \Delta h(t) - \Delta M_C(t). \quad (41)$$

Величину  $F_{D0} = \left( \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \right) - \left( \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0$  називають фактором статичної

стійкості двигуна. Тоді рівняння (41) записується в операторній формі:

$$(T_D p + 1) \Delta \omega(t) = K_{1D} \Delta h(t) + K_{2D} \Delta M_C(t), \quad (42)$$

де  $T_D$  – постійна часу двигуна;  $K_{1D}$ ,  $K_{2D}$  – коефіцієнти підсилення двигуна, причому

$$T_D = \frac{I_\Sigma}{F_{D0}}; K_{1D} = \frac{1}{F_{D0}} \left( \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0; K_{2D} = -\frac{1}{F_{D0}}.$$

Диференціальне рівняння (42) перетворимо за Лапласом:

$$(T_D s + 1) \cdot \Omega(s) = K_{1D} H(s). \quad (43)$$

Із співвідношення (43) запишемо передавальну функцію ДВЗ як об'єкта керування

$$W_D(s) = \frac{\Omega(s)}{H(s)} = \frac{K_{1D}}{T_D s + 1}. \quad (44)$$

### 2.3 Основне озброєння танка як об'єкт керування

Основним озброєнням українських танків Т-64 «Булат», Т-80УД «Берега» і Т-84 «Оплот» являється 125-мм танкова гармата, що може вести вогонь бронебійними, підкаліберними і кумулятивними снарядами, а також

керуваними ракетами з головками самонаведення, які наводяться на ціль по лазерному променю танкового прицілу-далекоміру.

У каналі вертикального наведення поворот танкової гармати здійснюється відносно осі цапф за допомогою електрогідравлічного підсилювача (ЕГП), який гідравлічно з'єднаний з виконавчим гідроциліндром (ВГЦ), як показано на рис.5.

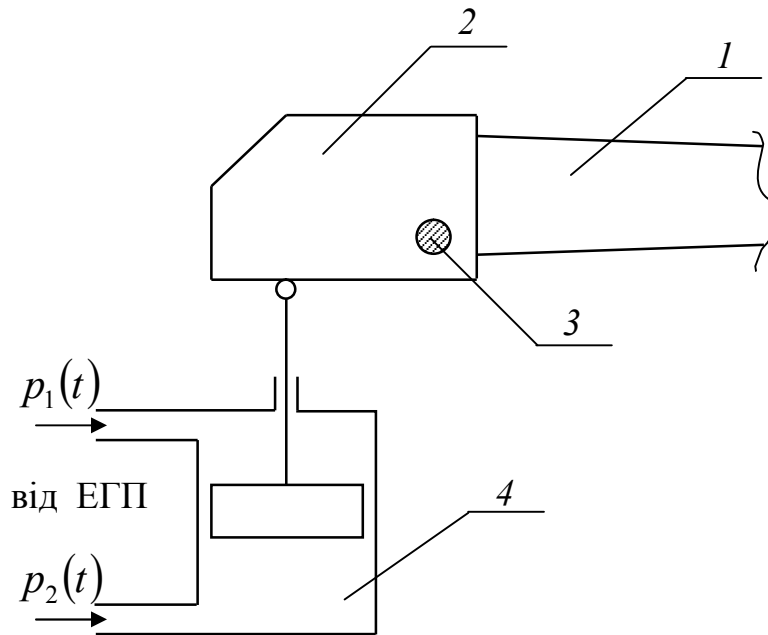


Рис. 5. Танкова гармата з ВГЦ:  
 1 – ствол гармати; 2 – казенна частина;  
 3 – вісь цапф; 4 – ВГЦ

У каналі вертикального наведення танкова гармата врівноважена відносно осі цапф. У цьому випадку умова динамічної рівноваги записується у вигляді

$$I_{II} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = M_C(t), \quad (45)$$

де  $\varphi(t)$  – кут відхилення осі каналу ствола від лінії прицілювання;  $M_C(t)$  – стабілізуючий момент;  $I_{II}$  – момент інерції гармати відносно осі цапф.

Стабілізуючий момент  $M_C(t)$  визначається залежністю

$$M_C(t) = K_M \Delta p(t) = K_M [p_1(t) - p_2(t)], \quad (46)$$

де  $p_1(t)$  і  $p_2(t)$  – значення тисків робочої рідини відповідно у верхній і нижній порожнинах ВГЦ;  $K_M$  – коефіцієнт пропорційності.

Величина різниці тисків  $\Delta p(t)$  визначається формулою [5]

$$\Delta p(t) = -K_D \beta(t),$$

де  $\beta(t)$  – кут повороту якоря електромагніта ЕГП;  $K_D$  – коефіцієнт пропорційності.

У результаті диференціальне рівняння збуреного руху танкової гармати (45) набуває вигляду

$$I_{II} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = -K_M K_D \beta(t). \quad (47)$$

Рівняння (47) перетворимо за Лапласом:

$$I_{II} s^2 \Phi(s) = -K_M K_D B(s). \quad (48)$$

З алгебраїчного рівняння (48) отримуємо передавальну функцію танкової гармати як об'єкта стабілізації:

$$W_{II}(s) = \frac{\Phi(s)}{B(s)} = -\frac{K_M K_D}{I_{II} s^2}. \quad (49)$$

### Розділ 3. ПОБУДОВА ОБЛАСТЕЙ СТІЙКОСТІ ЗАМКНЕНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ВАРІЙОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРУ

#### 3.1 Побудова областей стійкості балістичної ракети-носія зі стабілізатором аналогового типу в площині варійованих коефіцієнтів підсилення

Розглянемо рис.2, на якому зображена структурна схема замкненої системи стабілізації балістичної ракети. Схема містить два контури керування – внутрішній контур керування за боковим зміщенням і зовнішній контур керування за кутом відхилення.

Внутрішній контур реалізує закон керування у вигляді

$$\delta_y(t) = k_y y(t) + k_{\dot{y}} \dot{y}(t). \quad (50)$$

Передавальна функція внутрішнього контуру автомата стабілізації має вигляд (3). Запишемо співвідношення для передавальної функції розімкненого внутрішнього контуру автомата стабілізації

$$W_p^y(s) = W_o^y(s) W_{ac}^y(s) = - \frac{(a_{y\delta} s^2 - M)(k_y + k_{\dot{y}} s)}{s[s^3 - a'_{yy} s^2 - a_{\psi\psi} s + N]}. \quad (51)$$

Характеристичне рівняння замкненої системи керування внутрішнього контуру системи дорівнює [7]:

$$A_y(s) = 1 + W_p^y(s) = 0, \quad (52)$$

або

$$A_y(s) = s^4 - (a'_{yy} + a_{y\delta}k_{\dot{y}})s^3 - (a_{\psi\psi} + a_{y\delta}k_y)s^2 + (N + Mk_{\dot{y}})s + Mk_y = 0. \quad (53)$$

Передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру автомата стабілізації

$$W_p^\psi(s) = W_o^\psi(s)W_{ac}^\psi(s) = -\frac{(a_{\psi\delta}s - P)(k_\psi + k_{\dot{\psi}}s)}{s^3 - a'_{yy}s^2 - a_{\psi\psi}s + N}. \quad (54)$$

Тоді характеристичне рівняння замкненої системи, поданої на рис. 2, записується у вигляді

$$A(s) = 1 + W_p^y(s) + W_p^\psi(s) = s^4 - (a'_{yy} + a_{y\delta}k_{\dot{y}} + a_{\psi\delta}k_{\dot{\psi}})s^3 - (a_{\psi\psi} + a_{y\delta}k_y + a_{\psi\delta}k_\psi - Pk_{\dot{\psi}})s^2 + (N + Mk_{\dot{y}} + Pk_\psi)s + Mk_y = 0. \quad (55)$$

Якщо у рівнянні (55) покласти  $k_\psi = k_{\dot{\psi}} = 0$ , то отримуємо рівняння (53). У рівнянні (53) зробимо заміну:

$$s = j\omega; s^2 = -\omega^2; s^3 = -j\omega^3; s^4 = \omega^4. \quad (56)$$

В результаті маємо

$$\omega^4 + ja'_{yy}\omega^3 + ja_{y\delta}k_{\dot{y}}\omega^3 + a_{\psi\psi}\omega^2 + a_{y\delta}k_y\omega^2 + jN\omega + jMk_{\dot{y}}\omega + Mk_y = 0$$

Комплексна величина дорівнює нулю у тому випадку, коли окремо дорівнюють нулю її дійсна та уявна частини:

$$X(\omega, k_y, k_{\dot{y}}) = \omega^4 + a_{\psi\psi} \omega^2 + a_{y\delta} k_y \omega^2 + M k_y = 0; \quad (57)$$

$$Y(\omega, k_y, k_{\dot{y}}) = a'_{yy} \omega^2 + a_{y\delta} k_{\dot{y}} \omega^2 + N + M k_{\dot{y}} = 0. \quad (58)$$

Із співвідношень (57) і (58) маємо

$$k_y = \frac{1}{M + a_{y\delta} \omega^2} [-\omega^4 - a_{\psi\psi} \omega^2]; \quad (59)$$

$$k_{\dot{y}} = \frac{1}{M + a_{y\delta} \omega^2} [-a'_{yy} \omega^2 - N]. \quad (60)$$

З використанням співвідношень (59) і (60) побудуємо межу області стійкості при зміні величини  $\omega$  від 0 до  $\infty$ . Для виділення області стійкості застосуємо правило штриховки [6], для чого розглянемо визначник

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{\partial X(\omega, k_y, k_{\dot{y}})}{\partial k_y} & \frac{\partial X(\omega, k_y, k_{\dot{y}})}{\partial k_{\dot{y}}} \\ \frac{\partial Y(\omega, k_y, k_{\dot{y}})}{\partial k_y} & \frac{\partial Y(\omega, k_y, k_{\dot{y}})}{\partial k_{\dot{y}}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M + a_{y\delta} \omega^2 & 0 \\ 0 & M + a_{y\delta} \omega^2 \end{vmatrix} = (M + a_{y\delta} \omega^2)^2 > 0. \quad (61)$$

Якщо при русі вздовж межі області стійкості визначник (61) залишається позитивним, то межу слід штрихувати зліва, а якщо від'ємним, то справа. При цьому штриховка спрямована в середину області стійкості.

Програма, за допомогою якої здійснюється побудова області стійкості в програмному середовищі MATLAB, наведена в додатку А1.

В області стійкості оберемо значення варійованих параметрів  $k_y^*$  і  $k_{\dot{y}}^*$ , які забезпечують стійкість внутрішнього контуру стабілізації за боковим зсувом. Ці значення підставимо в характеристичне рівняння (55)

$$s^4 - (a'_{yy} + a_{y\delta}k_{\dot{y}}^* + a_{\psi\delta}k_{\dot{\psi}}^*)s^3 - (a_{\psi\psi} + a_{y\delta}k_y^* + a_{\psi\delta}k_{\psi} - Pk_{\dot{\psi}}^*)s^2 + (N + Mk_{\dot{y}}^* + Pk_{\psi})s + Mk_y^* = 0. \quad (62)$$

У рівнянні (62) зробимо заміну (56), виділимо дійсну та уявну частини і дорівнюємо їх нулю:

$$X(\omega, k_{\psi}, k_{\dot{\psi}}) = \omega^4 + \omega^2 [a_{\psi\psi} + a_{y\delta}k_y^*] + Mk_y^* + \omega^2 a_{\psi\delta}k_{\psi} - \omega^2 Pk_{\dot{\psi}} = 0; \quad (63)$$

$$Y(\omega, k_{\psi}, k_{\dot{\psi}}) = \omega^2 [a'_{yy} + a_{y\delta}k_{\dot{y}}^*] + \omega^2 a_{\psi\delta}k_{\dot{\psi}} + N + Mk_{\dot{y}}^* + Pk_{\psi} = 0. \quad (64)$$

Алгебраїчні рівняння (63) і (64) вирішимо відносно варійованих параметрів  $k_{\psi}$  і  $k_{\dot{\psi}}$ :

$$k_{\psi} = \frac{1}{(\omega^2 a_{\psi\delta}^2 + P^2)} \left\{ a_{\psi\delta} \left[ -\omega^4 - \omega^2 (a_{\psi\psi} + a_{y\delta}k_y^*) - Mk_y^* \right] + P \left[ -\omega^2 (a'_{yy} + a_{y\delta}k_{\dot{y}}^*) - (N + Mk_{\dot{y}}^*) \right] \right\}; \quad (65)$$

$$k_{\dot{\psi}} = \frac{1}{\omega^2(\omega^2 a_{\psi\delta}^2 + P^2)} \left\{ \omega^2 a_{\psi\delta} \left[ -\omega^2 (a'_{yy} + a_{y\delta} k_y^*) - (N + M k_{\dot{y}}^*) \right] + P \left[ \omega^4 + \omega^2 (a_{\psi\psi} + a_{y\delta} k_y^*) + M k_y^* \right] \right\}. \quad (66)$$

Використовуючи співвідношення (65) і (66), побудуємо межу області стійкості замкненої системи стабілізації за допомогою програми, що наведена в додатку А2.

Для нанесення штриховки розглянемо визначник (61):

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{\psi\delta} \omega^2 & -P \omega^2 \\ P & a_{\psi\delta} \omega^2 \end{vmatrix} = a_{\psi\delta}^2 \omega^4 + P^2 \omega^2 > 0. \quad (67)$$

Визначник (67) – позитивний, тобто штрихувати побудовану межу стійкості треба з лівого боку.

Всередині області стійкості оберемо значення варійованих параметрів  $k_{\psi}^*$  і  $k_{\dot{\psi}}^*$ , що разом з параметрами  $k_y^*$  і  $k_{\dot{y}}^*$  забезпечують стійкість замкненої системи стабілізації ракети-носія, схема якої наведена на рис. 2. При цьому закон стабілізації записується у вигляді

$$\delta(t) = k_y^* y(t) + k_{\dot{y}}^* \dot{y}(t) + k_{\psi}^* \psi(t) + k_{\dot{\psi}}^* \dot{\psi}(t). \quad (68)$$

Для побудови перехідних процесів в замкненій системі стабілізації у правій частині рівнянь (19) підставимо функцію (68) і скористуємося програмою інтегрування системи диференціальних рівнянь у додатку А3.

### 3.2 Визначення інтервалу стійкості коефіцієнта підсилення замкненої системи паливоподавання транспортного дизеля

Гідродинамічні системи паливоподавання транспортного дизеля містять один датчик, а саме відцентровий датчик кутової швидкості колінчастого вала. Перші експериментальні електронні системи паливоподавання танкових дизелів типу 5ТДФ і 6ТД також містили один датчик – індукційний датчик кутової швидкості колінчастого вала, а закон керування, що формувався електронним блоком 7 (рис. 3), мав вигляд

$$u(t) = k_{\omega} \omega(t). \quad (69)$$

Якщо момент навантаження на колінчастому валу двигуна постійний, а також нерухомою являється педаль керування подачею палива  $\alpha(t) = \alpha_0$ , то двигун працює в сталому режимі, коли активний момент дорівнює моменту навантаження, тобто виконується умова (38), а кутова швидкість колінчастого вала і стан рейки паливного насоса мають постійні значення  $\omega_0$  та  $h_0$ . Вихід зі сталого режиму може статися з двох причин: по-перше, внаслідок зміни дорожніх умов, що призводить до зміни моменту навантаження, і, по-друге, внаслідок зміни положення педалі подачею палива, що призводить до зміни активного моменту дизеля.

В районі точки сталого режиму збурений рух об'єкта керування описується диференціальним рівнянням (42), а збурений рух елементів автоматичного регулятора описується диференціальними рівняннями:

$$T_1^2 \Delta \ddot{S}(t) + T_2 \Delta \dot{S}(t) + \Delta S(t) = k_M \Delta u(t); \quad (70)$$

$$T_S \Delta \dot{z}(t) + \Delta z(t) = \Delta S(t); \quad (71)$$

$$T_h \Delta \dot{h}(t) + \Delta h(t) = k_z \Delta z(t). \quad (72)$$

З урахуванням співвідношення (69) рівняння (70) набирає вигляду

$$T_1^2 \Delta \ddot{S}(t) + T_2 \Delta \dot{S}(t) + \Delta S(t) = k_M k_\omega \Delta \omega(t), \quad (74)$$

а передавальна функція автоматичного регулятора записується як

$$W_a(s) = \frac{k_M k_z k_\omega}{(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)(T_S s + 1)(T_h s + 1)}. \quad (74)$$

Передавальна функція розімкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля записується у вигляді

$$W_p(s) = W_D(s) W_a(s) = \frac{k_{1D} k_M k_z k_\omega}{(T_D s + 1)(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)(T_S s + 1)(T_h s + 1)}. \quad (75)$$

Запишемо характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання:

$$1 - W_p(s) = 0, \quad (76)$$

або, з урахуванням позначень:

$$\begin{aligned} a_0 &= T_D T_1^2 T_S T_h; \\ a_1 &= T_D T_1^2 (T_S + T_h) + (T_D T_2 + T_1^2) T_S T_h; \\ a_2 &= T_D T_1^2 + (T_D T_2 + T_1^2)(T_S + T_h) + (T_D + T_2) T_S T_h; \\ a_3 &= T_D T_2 + T_1^2 + (T_D + T_2)(T_S + T_h) + T_S T_h; \\ a_4 &= T_D + T_2 + T_S + T_h; \\ a_0 s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + 1 - k_{1D} k_M k_z k_\omega &= 0. \end{aligned} \quad (77)$$

З характеристичного рівняння (77) маємо:

$$k_{\omega} = \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} (a_0s^5 + a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + 1). \quad (78)$$

У співвідношенні (78) здійснимо заміну:

$$s = j\omega; s^2 = -\omega^2; s^3 = -j\omega^3; s^4 = \omega^4; s^5 = j\omega^5.$$

$$k_{\omega} = \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} (ja_0\omega^5 + a_1\omega^4 - ja_2\omega^3 - a_3\omega^2 + ja_4\omega + 1). \quad (79)$$

Із співвідношення (79) маємо:

$$\mathbf{Re}k_{\omega} = \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} [a_1\omega^4 - a_3\omega^2 + 1]; \quad (80)$$

$$\mathbf{Im}k_{\omega} = \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} [a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega]. \quad (81)$$

В комплексній площині  $(\mathbf{Re}k_{\omega}, \mathbf{Im}k_{\omega})$  за допомогою співвідношень (80) і (81) при зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$  побудуємо криву, точки перетину якої з дійсною віссю визначають інтервал зміни коефіцієнта  $k_{\omega}$ , в якому замкнена система керування паливоподаванням транспортного двигуна є стійкою (додаток А4).

### 3.3 Побудова області стійкості замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля

Нехай закон керування паливоподаванням транспортного дизеля записується у вигляді [8]

$$\Delta u(t) = k_{\omega} \Delta \omega(t) + k_h \Delta h(t). \quad (82)$$

Тоді математична модель збуреного руху замкненої системи автоматичного керування записується у вигляді

$$\begin{aligned} T_D \Delta \dot{\omega}(t) + \Delta \omega(t) &= k_{1D} \Delta h(t); \\ T_1^2 \Delta \ddot{S}(t) + T_2 \Delta \dot{S}(t) + \Delta S(t) &= k_M k_{\omega} \Delta \omega(t) + k_M k_h \Delta h(t); \\ T_S \Delta \dot{z}(t) + \Delta z(t) &= \Delta S(t); \\ T_h \Delta \dot{h}(t) + \Delta h(t) &= k_z \Delta z(t). \end{aligned} \quad (83)$$

Розв'яжемо систему диференціальних рівнянь (83) відносно старших похідних:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega}(t) &= -\frac{1}{T_D} \Delta \omega(t) + \frac{k_{1D}}{T_D} \Delta h(t); \\ \Delta \ddot{S}(t) &= -\frac{T_2}{T_1^2} \Delta \dot{S}(t) - \frac{1}{T_1^2} \Delta S(t) + \frac{k_M k_{\omega}}{T_1^2} \Delta \omega(t) + \frac{k_M k_h}{T_1^2} \Delta h(t); \\ \Delta \dot{z}(t) &= -\frac{1}{T_S} \Delta z(t) + \frac{1}{T_S} \Delta S(t); \\ \Delta \dot{h}(t) &= -\frac{1}{T_h} \Delta h(t) + \frac{k_z}{T_h} \Delta z(t). \end{aligned} \quad (84)$$

Систему диференціальних рівнянь (84) запишемо у векторно-матричній формі:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t), \quad (85)$$

де  $X(t)$  – вектор стану системи;  $A$  – власна матриця системи

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega(t) \\ \Delta S(t) \\ \Delta\dot{S}(t) \\ \Delta z(t) \\ \Delta h(t) \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_D} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{1D}}{T_D} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_M k_\omega}{T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} & 0 & \frac{k_M k_h}{T_1^2} \\ 0 & \frac{1}{T_S} & 0 & -\frac{1}{T_S} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_z}{T_h} & -\frac{1}{T_h} \end{bmatrix}.$$

Тоді характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання записується у вигляді

$$\det[A - Es] = 0,$$

або

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_D} - s & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{1D}}{T_D} \\ 0 & -s & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_M k_\omega}{T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} - s & 0 & \frac{k_M k_h}{T_1^2} \\ 0 & \frac{1}{T_S} & 0 & -\frac{1}{T_S} - s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_z}{T_h} & -\frac{1}{T_h} - s \end{bmatrix} = 0. \quad (86)$$

Розкриємо визначник (86)

$$k_{1Д}k_Mk_zk_\omega + k_Mk_zk_hT_Дs + k_Mk_zk_h = 1 + a_4s + a_3s^2 + a_2s^3 + a_1s^4 + a_0s^5. \quad (87)$$

У характеристичному рівнянні (87) здійснимо заміну:

$$s = j\omega; s^2 = -\omega^2; s^3 = -j\omega^3; s^4 = \omega^4; s^5 = j\omega^5.$$

$$\begin{aligned} k_{1Д}k_Mk_zk_\omega + jk_Mk_zk_hT_Д\omega + k_Mk_zk_h &= \\ = 1 + ja_4\omega - a_3\omega^2 - ja_2\omega^3 + a_1\omega^4 + ja_0\omega^5. \end{aligned} \quad (88)$$

У лівій і правій частинах рівняння (88) дорівнюємо дійсну та уявну частини:

$$\begin{aligned} k_{1Д}k_Mk_zk_\omega + k_Mk_zk_h &= 1 - a_3\omega^2 + a_1\omega^4; \\ k_Mk_zk_hT_Д &= a_4 - a_2\omega^2 + a_0\omega^4. \end{aligned} \quad (89)$$

З системи алгебраїчних рівнянь (89) маємо:

$$k_\omega = \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} \left\{ 1 - \frac{a_4}{T_Д} + \left( \frac{a_2}{T_Д} - a_3 \right) \omega^2 - \left( \frac{a_0}{T_Д} - a_1 \right) \omega^4 \right\}; \quad (90)$$

$$k_h = \frac{1}{k_Mk_zT_Д} [a_4 - a_2\omega^2 + a_0\omega^4]. \quad (91)$$

За допомогою співвідношень (90) і (91) побудуємо межу області стійкості в площині варійованих параметрів  $k_\omega$ ,  $k_h$ , використовуючи програму у додатку А.5.

Для визначення області стійкості застосуємо правило штриховки. Розглянемо визначник (61):

$$\Delta = \begin{vmatrix} k_{1D}k_Mk_z & k_Mk_z \\ 0 & k_Mk_zT_D \end{vmatrix} = k_{1D}k_M^2k_z^2T_D. \quad (92)$$

Коефіцієнт  $k_{1D}$  має від'ємне значення, отже, від'ємне значення має і визначник (92), тобто межу області стійкості, пересуваючись вздовж неї у бік зростання  $\omega$ , слід штрихувати праворуч.

### 3.4 Побудова області стійкості замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати зі стабілізатором цифрового типу

Збурений рух безперервної частини замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати з цифровим стабілізатором описується диференціальними рівняннями (47) і (17). Введемо у розгляд поняття вектора стану безперервної частини:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix}$$

і запишемо математичну модель збуреного руху безперервної частини системи в нормальній формі Коші:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{T_n^2} x_3(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= -\frac{1}{T_1^2} x_3(t) - \frac{T_2}{T_1^2} x_4(t) + \frac{k}{T_1^2} u(t), \end{aligned} \quad (93)$$

де  $T_n$  – постійна часу танкової гармати;  $T_1, T_2$  – постійні часу електрогідрравлічного підсилювача;  $k$  – коефіцієнт підсилення:

$$T_n^2 = \frac{I_{II}}{K_M K_D}; T_1^2 = \frac{I_K}{c}; T_2 = \frac{f}{c}; k = \frac{k_e}{c \cdot r_y}.$$

Систему диференціальних рівнянь (93) запишемо у векторно-матричному вигляді:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t), \quad (94)$$

де  $U(t) = u(t)$ , а матриці  $A$  і  $B$  мають вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_n^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k}{T_1^2} \end{bmatrix}.$$

Тоді різницеве рівняння, що пов'язує початковий стан безперервної частини системи  $X[kT]$  з кінцевим станом  $X[(k+1)T]$  на кожному періоді дискретності, має вигляд [9]

$$X[(k+1)T] = \Phi \cdot X[kT] + H \cdot U[kT], \quad (95)$$

де матриці  $\Phi$  та  $H$  визначаються формулами

$$\Phi = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} A^i T^i; \quad (96)$$

$$H = \sum_{i=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(i+1)!} A^i T^{i+1} \right] B. \quad (97)$$

Кількість членів матричних рядів (96) і (97), які необхідно підсумувати, залежить від величини дискретності  $T$ . Звичайно з достатньою для розв'язання практичних задач точністю покладають

$$\Phi = E + AT; H = BT. \quad (98)$$

Припустимо, що бортова ЕОМ реалізує такий алгоритм наведення і стабілізації:

$$U[kT] = K \cdot X[kT], \quad (99)$$

де  $K$  – матриця констант алгоритму керування.

Підставимо (99) у рівняння (95). У результаті отримаємо різницеве рівняння збуреного руху замкненої САУ:

$$X[(k+1)T] = [\Phi + H \cdot K]X[kT]. \quad (100)$$

Характеристичне рівняння замкненої системи (100) записується у вигляді

$$\det[\Phi + H \cdot K - Ez] = 0. \quad (101)$$

Нехай бортова ЕОМ реалізує такий алгоритм наведення і стабілізації:

$$u[nT] = k_\varphi k_\Gamma \varphi[nT] + k_{\dot{\varphi}} k_c \dot{\varphi}[nT]. \quad (102)$$

Слід зауважити, що в правій частині співвідношення (102) величина  $\dot{\varphi}[nT]$  не означає похідну за часом від решітчастої функції  $\varphi[nT]$ . Запис

$\phi[nT]$  означає решітчасту функцію, яка відповідає безперервній функції часу  $\phi[nT]$ .

Вектор стану дискретної системи  $X[nT]$  має вигляд

$$X[nT]X(t) = \begin{bmatrix} x_1[nT] \\ x_2[nT] \\ x_3[nT] \\ x_4[nT] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi[nT] \\ \dot{\phi}[nT] \\ \beta[nT] \\ \dot{\beta}[nT] \end{bmatrix}.$$

Тоді решітчаста функція (102) записується як

$$u[nT] = k_\phi k_\Gamma x_1[nT] + k_{\dot{\phi}} k_c x_2[nT], \quad (103)$$

а матриця  $K$  у співвідношенні (99) дорівнює:

$$K = \begin{bmatrix} k_\phi k_\Gamma & k_{\dot{\phi}} k_c & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

матриці (98) приймають вигляд

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{T}{T_n^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & -\frac{T}{T_1^2} & -\frac{T_2 T}{T_1^2} \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kT}{T_1^2} \end{bmatrix}.$$

У результаті характеристичне рівняння (101) набуває вигляду

$$\begin{bmatrix} 1-z & T & 0 & 0 \\ 0 & 1-z & -\frac{T}{T_n^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1-z & T \\ \frac{kk_\Gamma T}{T_1^2} & \frac{kk_c T}{T_1^2} & -\frac{T}{T_1^2} & 1-z - \frac{T_2 T}{T_1^2} \end{bmatrix} = \quad (104)$$

$$= (1-z)^4 - \frac{T_2 T}{T_1^2} (1-z)^3 + \frac{T^2}{T_1^2} (1-z)^2 - \frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} (1-z) k_{\dot{\phi}} + \frac{T^4 k k_\Gamma}{T_n^2 T_1^2} k_\phi = 0$$

У характеристичному рівнянні (104) здійснимо заміну:

$$\begin{aligned} z &= \frac{1+w}{1-w}; \quad (1-z) = -\frac{2w}{1-w}; \quad (1-z)^2 = \frac{4w^2}{1-2w+w^2}; \\ (1-z)^3 &= -\frac{8w^3}{1-3w+3w^2-w^3}; \quad (1-z)^4 = \frac{16w^4}{1-4w+6w^2-4w^3+w^4}. \end{aligned} \quad (105)$$

У співвідношеннях (105) здійснимо заміну:  $w = j\omega$ . У результаті ма-

ємо:

$$\begin{aligned} (1-z) &= \alpha_1(\omega) + j\beta_1(\omega); \\ (1-z)^2 &= \alpha_2(\omega) + j\beta_2(\omega); \\ (1-z)^3 &= \alpha_3(\omega) + j\beta_3(\omega); \\ (1-z)^4 &= \alpha_4(\omega) + j\beta_4(\omega), \end{aligned} \quad (106)$$

де

$$\begin{aligned} \alpha_1(\omega) &= \frac{2\omega^2}{1+\omega^2}; \quad \beta_1(\omega) = -\frac{2\omega}{1+\omega^2}; \\ \alpha_2(\omega) &= -\frac{4\omega^2(1-\omega^2)}{(1-\omega^2)^2+4\omega^2}; \quad \beta_2(\omega) = -\frac{8\omega^3}{(1-\omega^2)^2+4\omega^2}; \\ \alpha_3(\omega) &= -\frac{8\omega^4(3-\omega^2)}{(1-3\omega^2)^2+\omega^2(3-\omega^2)^2}; \\ \beta_3(\omega) &= \frac{8\omega^3(1-3\omega^2)}{(1-3\omega^2)^2+\omega^2(3-\omega^2)^2}; \\ \alpha_4(\omega) &= \frac{16\omega^4(1-6\omega^2+\omega^4)}{(1-6\omega^2+\omega^4)^2+16\omega^2(1-\omega^2)^2}; \\ \beta_4(\omega) &= \frac{64\omega^5(1-\omega^2)}{(1-6\omega^2+\omega^4)^2+16\omega^2(1-\omega^2)^2}. \end{aligned} \quad (107)$$

З урахуванням співвідношень (106), (107) характеристичне рівняння (104) набуває вигляду

$$\begin{aligned} & \alpha_4(\omega) + j\beta_4(\omega) - \frac{T_2 T}{T_1^2} [\alpha_3(\omega) + j\beta_3(\omega)] + \frac{T^2}{T_1^2} [\alpha_2(\omega) + j\beta_2(\omega)] - \\ & - \frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} [\alpha_1(\omega) + j\beta_1(\omega)] k_{\dot{\varphi}} + \frac{T^4 k k_{\Gamma}}{T_n^2 T_1^2} k_{\varphi} = 0. \end{aligned} \quad (108)$$

Комплексна величина дорівнює нулю у тому випадку, якщо окремо дорівнюють нулю її дійсна і уявна частини, тому рівняння (108) еквівалентне двом рівнянням:

$$\begin{aligned} X(\omega, k_{\varphi}, k_{\dot{\varphi}}) &= \alpha_4(\omega) - \frac{T_2 T}{T_1^2} \alpha_3(\omega) + \frac{T^2}{T_1^2} \alpha_2(\omega) - \\ & - \frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} \alpha_1(\omega) k_{\dot{\varphi}} + \frac{T^4 k k_{\Gamma}}{T_n^2 T_1^2} k_{\varphi} = 0; \end{aligned} \quad (109)$$

$$Y(\omega, k_{\varphi}, k_{\dot{\varphi}}) = \beta_4(\omega) - \frac{T_2 T}{T_1^2} \beta_3(\omega) + \frac{T^2}{T_1^2} \beta_2(\omega) - \frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} \beta_1(\omega) k_{\dot{\varphi}} = 0. \quad (110)$$

З рівняння (110) маємо

$$k_{\dot{\varphi}} = \frac{T_n^2 T_1^2}{T^3 k k_c} \frac{1}{\beta_1(\omega)} \left[ \frac{T^2}{T_1^2} \beta_2(\omega) - \frac{T_2 T}{T_1^2} \beta_3(\omega) + \beta_4(\omega) \right]. \quad (111)$$

Підставимо величину  $k_{\dot{\varphi}}$  у рівняння (109) і розв'яжемо його відносно величини  $k_{\varphi}$ :

$$k_\varphi = \frac{T_n^2 T_1^2}{T^4 k k_\Gamma} \left\{ \frac{\alpha_1(\omega)}{\beta_1(\omega)} \left[ \frac{T^2}{T_1^2} \beta_2(\omega) - \frac{T_2 T}{T_1^2} \beta_3(\omega) + \beta_4(\omega) \right] - \frac{T^2}{T_1^2} \alpha_2(\omega) + \frac{T_2 T}{T_1^2} \alpha_3(\omega) - \alpha_4(\omega) \right\}. \quad (112)$$

За допомогою співвідношень (111) та (112) в площині варійованих параметрів  $k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}$  побудуємо межу області стійкості замкненої системи при зміні величини  $\omega$  від 0 до  $\infty$ . При цьому використовується програма, наведена у додатку А.6.

Для нанесення штриховки розглянемо визначник (61)

$$\begin{vmatrix} \frac{T^4 k k_\Gamma}{T_n^2 T_1^2} & -\frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} \alpha_1(\omega) \\ 0 & -\frac{T^3 k k_c}{T_n^2 T_1^2} \beta_1(\omega) \end{vmatrix} = \frac{T^7 k k_\Gamma k_c}{T_n^4 T_1^4} \frac{2\omega}{1 + \omega^2} > 0. \quad (113)$$

Визначник (113) при  $\omega > 0$  позитивний, отже переміщуючись уздовж межі області стійкості у бік зростання  $\omega$ , слід штрихувати межу з лівого боку.

## Розділ 4. ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

### 4.1 Синтез замкнених систем автоматичного керування оптимальних за запасом стійкості та швидкодією

Стійкість замкнених систем автоматичного керування є необхідною, але далеко не достатньою умовою їх практичної придатності. Будь-яка замкнена система автоматичного керування повинна бути стійкою і задовольняти визначені критерії якості, найважливішими з яких є запас стійкості та швидкодія.

Запас стійкості системи автоматичного керування визначає наскільки далеко від межі області стійкості знаходиться система керування. Корені характеристичного рівняння можна розглядати як точки на комплексній площині. Для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб усі корені знаходилися ліворуч від уявної осі площини коренів. Чим далі від цієї осі розміщені корені характеристичного рівняння, тим вище запас стійкості системи.

Швидкодія системи автоматичного керування визначається за часом затухання перехідного процесу  $t_n$ .

Запас стійкості системи можна оцінити відстанню  $\alpha$  у площині коренів від уявної осі до найближчого кореня характеристичного рівняння (рис. 6).

Запас стійкості  $\alpha$  і швидкодія  $t_n$  системи автоматичного керування пов'язані між собою залежністю [6]:

$$t_n = \frac{3}{|\alpha|},$$

отже, чим вище запас стійкості системи, тим швидше затухає перехідний процес у системі, тобто вище її швидкодія.

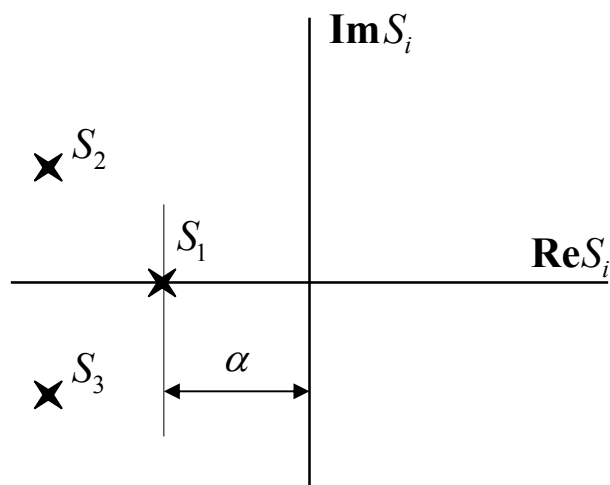


Рис. 6. До визначення запасу стійкості системи

Якщо в характеристичному рівнянні системи автоматичного керування зробити заміну [10]

$$s = \alpha + j\omega, \quad (114)$$

де  $\alpha < 0$ , то, змінюючи  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , можна побудувати в площині параметрів регулятора лінію рівного запасу стійкості, в будь-якій точці якої запас стійкості постійний і дорівнює  $\alpha$ . Якщо обрати значення варійованих параметрів регулятора в області, яка обмежується цією лінією, то запас стійкості такої системи більший, ніж  $\alpha$ . Коли у співвідношенні (114) величина  $\alpha$  досягає значення  $\alpha_1$ , де  $\alpha_1$  – запас стійкості замкненої системи керування, то лінія запасу стійкості вироджується у точку або лінію максимального запасу стійкості системи.

Розглянемо характеристичне рівняння замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля (77) при реалізації електронним блоком алгоритму керування (69). У рівнянні (77) здійснимо заміну:

$$\begin{aligned}
s &= \alpha + j\omega; \quad s^2 = (\alpha^2 - \omega^2) + j2\alpha\omega; \\
s^3 &= (\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + j(3\alpha^2\omega - \omega^3); \\
s^4 &= (\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) + j4(\alpha^2 - \omega^2)\alpha\omega; \\
s^5 &= (\alpha^5 - 10\alpha^3\omega^2 + 5\alpha\omega^4) + j(\omega^5 - 10\alpha^2\omega^3 + 5\alpha^4\omega).
\end{aligned} \tag{115}$$

Підставимо співвідношення (115) в характеристичне рівняння (77), виділимо дійсну та уявну частини і окремо прирівняємо їх нулю. В результаті маємо:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Re} k_\omega &= \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} [1 + a_4\alpha + a_3(\alpha^2 - \omega^2) + a_2(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \\
&+ a_1(\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) + a_0(\alpha^5 - 10\alpha^3\omega^2 + 5\alpha\omega^4)];
\end{aligned} \tag{116}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{Im} k_\omega &= \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} [a_4\omega + a_32\alpha\omega + a_2(3\alpha^2\omega - \omega^3) + \\
&+ a_14(\alpha^2 - \omega^2)\alpha\omega + a_0(\omega^5 - 10\alpha^2\omega^3 + 5\alpha^4\omega)].
\end{aligned} \tag{117}$$

Якщо у співвідношеннях (116) і (117) покласти  $\alpha = 0$ , то отримуємо співвідношення (80) і (81) для побудови області стійкості замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля.

Використовуючи програму у додатку А7, побудуємо лінії рівного запасу стійкості і оберемо величину параметра  $k_\omega^*$ , що забезпечує максимальне значення запасу стійкості і швидкодії замкненої системи керування.

## 4.2 Синтез замкнених систем автоматичного керування оптимальних за точністю (інваріантних до дії зовнішніх збурень)

В інваріантних системах автоматичного керування звичайно поєднані два основних принципів керування, а саме принцип керування за відхиленням і принцип керування за зовнішнім збуренням.

Дійсно, датчик кутової швидкості колінчастого вала вимірює відхилення величини, що регулюється, (кутової швидкості)  $\Delta\omega(t)$  від її значення у сталому режимі  $\omega_0$ , а датчик положення рейки паливного насоса вимірює відхилення рейки  $\Delta h(t)$  від її стану у сталому режимі  $h_0$ , тобто, по суті, є датчиком зовнішнього навантаження на колінчастому валу дизеля. Тобто закон керування (82) забезпечує інваріантність замкненої системи до зовнішнього збурення  $\Delta M_c(t)$ .

Розглянемо характеристичне рівняння замкненої інваріантної системи (87). В цьому рівнянні зробимо заміну (115), виділимо дійсну і уявну частини, прирівняємо їх до нуля і в результаті отримаємо два алгебраїчних рівняння відносно варійованих параметрів  $k_\omega$  і  $k_h$ :

$$k_{1Д}k_Mk_zk_\omega + k_Mk_z(1 + T_D\alpha)k_h = 1 + a_4\alpha + a_3(\alpha^2 - \omega^2) + a_2(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + a_1(\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) + a_0(\alpha^5 - 10\alpha^3\omega^2 + 5\alpha\omega^4); \quad (118)$$

$$k_Mk_zT_Dk_h = a_4 + a_32\alpha + a_2(3\alpha^2 - \omega^2) + a_14(\alpha^2 - \omega^2)\alpha + a_0(\omega^4 - 10\alpha^2\omega^2 + 5\alpha^4). \quad (119)$$

З системи (118), (119) маємо:

$$\begin{aligned}
k_{\omega} = & \frac{1}{k_{1Д}k_Mk_z} \left\{ -\frac{1+T_D\alpha}{T_D} [a_4 + a_3 2\alpha + a_2(3\alpha^2 - \omega^2)] + \right. \\
& + a_1 4(\alpha^2 - \omega^2)\alpha + a_0(\omega^4 - 10\alpha^2\omega^2 + 5\alpha^4) \Big] + \\
& 1 + a_4\alpha + a_3(\alpha^2 - \omega^2) + a_2(\alpha^3 - 3\alpha\omega^2) + \\
& \left. + a_1(\alpha^4 - 6\alpha^2\omega^2 + \omega^4) + a_0(\alpha^5 - 10\alpha^3\omega^2 + 5\alpha\omega^4) \right\};
\end{aligned} \tag{120}$$

$$\begin{aligned}
k_h = & \frac{1}{k_Mk_zT_D} [a_4 + a_3 2\alpha + a_2(3\alpha^2 - \omega^2) + \\
& + a_1 4(\alpha^2 - \omega^2)\alpha + a_0(\omega^4 - 10\alpha^2\omega^2 + 5\alpha^4) \Big].
\end{aligned} \tag{121}$$

Якщо у співвідношеннях (120) і (121) покласти  $\alpha = 0$ , то отримуємо співвідношення (90) і (91).

Використовуючи співвідношення (120) і (121), а також програму, що наведена у додатку А.8, побудуємо лінії рівного запасу стійкості в площині варійованих параметрів  $k_{\omega}$ ,  $k_h$ .

### 4.3 Розгляд перехідних процесів в замкнених системах автоматичного керування

Кінцевим етапом процесу параметричного синтезу системи автоматичного керування є розгляд динамічних процесів у замкненій системі керування. При побудові динамічних процесів у замкненій системі керування зазвичай покладають, що зовнішні збурення, які діють на систему, відсутні, а результатом дії зовнішніх збурень являється вихід системи із незбуреного стану  $X_0 = 0$  у визначений початковий стан  $X(0)$  в момент  $t = 0$ , а в подальшому розглядають вільний рух замкненої системи керування:

$$\dot{X}(t) = AX(t) \quad (112)$$

з початковою умовою  $X(0)$ . У зв'язку з тим, що властивості системи (112) залежать тільки від значень параметрів об'єкта керування і варійованих параметрів автоматичного регулятора і не залежать від зовнішніх збурень, що, як правило, є випадковими, то такий підхід, запропонований О. М. Ляпуновим [5], є найбільш ефективним засобом оцінки якості синтезованої системи.

Розглянемо замкнену систему автоматичної стабілізації балістичної ракети. Для цього в праві частини диференціальних рівнянь збуреного руху об'єкта стабілізації (19) підставимо функцію керування  $\delta(t)$ , що визначається формулою (2), яка в компонентах вектору стану  $X(t)$  об'єкта записується у вигляді

$$\delta(t) = k_y x_1(t) + k_{\dot{y}} x_2(t) + k_{\psi} x_3(t) + k_{\dot{\psi}} x_4(t). \quad (123)$$

У результаті отримуємо математичну модель збуреного руху замкненої системи стабілізації в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a'_{yy} x_2(t) + a_{y\psi} x_3(t) + a_{y\delta} [k_y x_1(t) + k_{\dot{y}} x_2(t) + k_{\psi} x_3(t) + k_{\dot{\psi}} x_4(t)]; \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= a'_{\psi y} x_2(t) + a_{\psi\psi} x_3(t) + a_{\psi\delta} [k_y x_1(t) + k_{\dot{y}} x_2(t) + k_{\psi} x_3(t) + k_{\dot{\psi}} x_4(t)]. \end{aligned} \quad (124)$$

У відповідності з матеріалом розділу 3 побудуємо області стійкості замкненої системи (124) в площинах варійованих параметрів  $(k_y, k_{\dot{y}})$  і

$(k_{\psi}, k_{\dot{\psi}})$ , оберемо у цих областях значення варійованих параметрів  $k_y^*$ ,  $k_{\dot{y}}^*$ ,  $k_{\psi}^*$  і  $k_{\dot{\psi}}^*$ , підставимо ці значення у праві частини диференціальних рівнянь (124) і проінтегруємо ці рівняння при початкових умовах  $x_1(0) = x_{10}$ ,  $x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = 0$  за допомогою програми, наведеної у додатку А3.

Перейдемо до розгляду замкненої системи автоматичного керування паливоподачею транспортного дизеля, електронний блок якої реалізує закон керування у вигляді (69). Тоді у правій частині другого рівняння математичної моделі (84) покладемо  $k_h = 0$  і запишемо математичну модель (84) в нормальній формі Коші відносно компонент вектору стану

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega(t) \\ \Delta S(t) \\ \Delta\dot{S}(t) \\ \Delta z(t) \\ \Delta h(t) \end{bmatrix}$$

В результаті маємо:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{1}{T_D} x_1(t) + \frac{k_{1D}}{T_D} x_5(t); \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t); \\ \dot{x}_3(t) &= -\frac{T_2}{T_1^2} x_3(t) - \frac{1}{T_1^2} x_2(t) + \frac{k_M k_\omega}{T_1^2} x_1(t); \\ \dot{x}_4(t) &= -\frac{1}{T_S} x_4(t) + \frac{1}{T_S} x_2(t); \\ \dot{x}_5(t) &= -\frac{1}{T_h} x_5(t) + \frac{k_z}{T_h} x_4(t). \end{aligned} \quad (125)$$

Відповідно до матеріалу розділу 4.1 побудуємо лінії рівного запасу стійкості і визначимо значення варійованого коефіцієнта  $k_{\omega}^*$ , який забезпечує замкненій системі максимальний запас стійкості і швидкодію. Підставимо величину  $k_{\omega}^*$  в праву частину третього рівняння системи (125) і проінтегруємо систему (125) при початкових умовах  $x_1(0) = x_{10}$ ;  $x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = x_5(0) = 0$  за допомогою програми, що наведена у додатку А.9.

Використовуючи програму у додатку А10, можна побудувати перехідні процеси для інваріантної системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля, електронний блок якої реалізує закон керування у вигляді (82).

Перейдемо до розгляду перехідних процесів у замкненій цифровій системі наведення і стабілізації танкової гармати. Сучасні бортові цифрові обчислювальні машини (БЦОМ) мають малий період квантування  $T$ . Тому, визначивши область стійкості відповідно до підрозділу 3.4, обирають значення варійованих констант  $k_{\varphi}^*$  і  $k_{\dot{\varphi}}^*$  алгоритму (102), аналіз перехідних процесів здійснюють за рішенням системи диференціальних рівнянь (47) і (17) при формуванні закону стабілізації у вигляді

$$u(t) = k_{\varphi}^* k_{\Gamma} \varphi(t) + k_{\dot{\varphi}}^* k_c \dot{\varphi}(t). \quad (126)$$

Подамо математичну модель замкненої системи в формі Коші. Вектор стану замкненої системи має вигляд

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) \\ \beta(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (127)$$

Рівняння (47) і (17) подамо у вигляді

$$\begin{aligned} T_n^2 \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} &= -\beta(t); \\ T_1^2 \ddot{\beta}(t) + T_2 \dot{\beta}(t) + \beta(t) &= ku(t), \end{aligned} \quad (128)$$

де  $T_n$  – постійна часу танкової гармати;  $T_1, T_2$  – постійні часу електрогідрравлічного підсилювача;  $k$  – коефіцієнт підсилення, причому

$$T_n^2 = \frac{I_{II}}{K_M K_D}; T_1^2 = \frac{I_K}{c}; T_2 = \frac{f}{c}; k = \frac{k_e}{c \cdot r_y}.$$

Вирішимо рівняння (128) відносно старших похідних, підставивши у праву частину другого рівняння (128) співвідношення (126):

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(t) &= -\frac{1}{T_n^2} \beta(t); \\ \ddot{\beta}(t) &= -\frac{T_2}{T_1^2} \dot{\beta}(t) - \frac{1}{T_1^2} \beta(t) + \frac{k}{T_1^2} \left[ k_{\varphi}^* k_{\Gamma} \varphi(t) + k_{\dot{\varphi}}^* k_c \dot{\varphi}(t) \right]. \end{aligned} \quad (129)$$

В результаті маємо

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\
\dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{T_n^2} x_3(t); \\
\dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\
\dot{x}_4(t) &= -\frac{1}{T_1^2} x_3(t) - \frac{T_2}{T_1^2} x_4(t) + \frac{k}{T_1^2} \left[ k_\varphi^* k_T x_1(t) + k_\varphi^* k_c x_2(t) \right]
\end{aligned}
\tag{130}$$

Проінтегруємо систему диференціальних рівнянь (130) при початкових умовах  $x_1(0) = x_{10}$ ,  $x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = 0$  за допомогою програми, наведеної у додатку А11. У результаті отримаємо перехідні процеси у замкненій цифровій системі наведення і стабілізації танкової гармати.

## ТЕМИ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНИХ РОБІТ

1. Побудувати межу області стійкості замкненої системи стабілізації балістичної ракети-носія в площині  $(k_y, k_{\dot{y}})$  при таких значеннях коефіцієнтів математичної моделі збуреного руху (додаток А1):

$$a_{\psi\psi} = -2 \text{ с}^{-2}; \quad a'_{\psi y} = -5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}; \quad a_{\psi\delta} = -1,2 \text{ с}^{-2}; \\ a_{y\psi} = -35 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}; \quad a'_{yy} = -10 \text{ с}^{-1}; \quad a_{y\delta} = 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

2. Побудувати межу області стійкості замкненої системи стабілізації балістичної ракети-носія в площині  $(k_\psi, k_{\dot{\psi}})$  при таких значеннях коефіцієнтів математичної моделі збуреного руху (додаток А2):

$$a_{\psi\psi} = -2 \text{ с}^{-2}; \quad a'_{\psi y} = -5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}; \quad a_{\psi\delta} = -1,2 \text{ с}^{-2}; \\ a_{y\psi} = -35 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}; \quad a'_{yy} = -10 \text{ с}^{-1}; \quad a_{y\delta} = 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

і значень коефіцієнтів підсилення стабілізатора в каналі бокового зсуву:

$$k_y^* = -0,005 \text{ м}^{-1}; \quad k_{\dot{y}}^* = -3,5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}.$$

3. Побудувати перехідні процеси в замкненій системі автоматичної стабілізації балістичної ракети-носія при таких значеннях коефіцієнтів математичної моделі збуреного руху ракети (додаток А3):

$$a_{\psi\psi} = -2 \text{ с}^{-2}; \quad a'_{\psi y} = -5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}; \quad a_{\psi\delta} = -1,2 \text{ с}^{-2}; \\ a_{y\psi} = -35 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}; \quad a'_{yy} = -10 \text{ с}^{-1}; \quad a_{y\delta} = 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

і значень коефіцієнтів підсилення стабілізатора:

$$k_y^* = -0,005 \text{ м}^{-1}; \quad k_{\dot{y}}^* = -3,5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}; \\ k_\psi^* = 40; \quad k_{\dot{\psi}}^* = 0,4 \text{ с}.$$

4. Побудувати межу області стійкості в комплексній площині  $(\text{Re } k_\omega, \text{Im } k_\omega)$  і визначити інтервал стійкості замкненої системи автоматич-

ного керування паливopодаванням транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А4):

$$\begin{aligned}T_D &= 0,3 \text{ с}; \quad k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; \quad T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2; \\T_2 &= 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; \quad T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\T_h &= 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_z = -3,5.\end{aligned}$$

5. Побудувати межу області стійкості в площині варійованих параметрів  $(k_\omega, k_h)$  замкненої інваріантної системи автоматичного керування паливopодаванням транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А5):

$$\begin{aligned}T_D &= 0,3 \text{ с}; \quad k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; \quad T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2; \\T_2 &= 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; \quad T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\T_h &= 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_z = -3,5.\end{aligned}$$

6. Визначити оптимальне за запасом стійкості і швидкодією значення коефіцієнта підсилення  $k_\omega$  системи паливopодавання транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А7):

$$\begin{aligned}T_D &= 0,3 \text{ с}; \quad k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; \quad T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2; \\T_2 &= 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; \quad T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\T_h &= 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_z = -3,5.\end{aligned}$$

7. Визначити оптимальне за запасом стійкості і швидкодією значення коефіцієнтів підсилення  $k_\omega$  і  $k_h$  системи паливopодавання транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А8):

$$\begin{aligned}T_D &= 0,3 \text{ с}; \quad k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; \quad T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2; \\T_2 &= 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; \quad T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\T_h &= 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_z = -3,5.\end{aligned}$$

8. Побудувати перехідні процеси в замкненій системі паливоподавання транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А9):

$$T_D = 0,3 \text{ с}; k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2;$$

$$T_2 = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$T_h = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; k_z = -3,5; k_\omega^* = 13,1 \text{ в} \cdot \text{с}.$$

9. Побудувати перехідні процеси в замкненій інваріантній системі паливоподавання транспортного дизеля при таких значеннях параметрів системи (додаток А10):

$$T_D = 0,3 \text{ с}; k_{1D} = -10^3 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}; T_1^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2;$$

$$T_2 = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; k_M = 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{в}^{-1}; T_S = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$T_h = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; k_z = -3,5; k_\omega^* = 12 \text{ в} \cdot \text{с}; k_h^* = 13 \text{ в} \cdot \text{м}^{-1}.$$

10. Побудувати межу області стійкості замкненої цифрової системи наведення і стабілізації танкової гармати в площині  $k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}$  при таких значеннях параметрів безперервної частини системи (додаток А6):

$$T_n = 0,315 \text{ с}; T_1 = 0,985 \cdot 10^{-2} \text{ с}; T_2 = 0,545 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$k_G = 1 \text{ в}; k_c = 0,2 \text{ в} \cdot \text{с}; k = 0,33 \text{ в}^{-1};$$

$$T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}; T = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

11. Побудувати перехідні процеси в замкненій цифровій системі наведення і стабілізації танкової гармати при таких значеннях параметрів замкненої системи (додаток А11):

$$T_n = 0,315 \text{ с}; T_1 = 0,985 \cdot 10^{-2} \text{ с}; T_2 = 0,545 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$k_G = 1 \text{ в}; k_c = 0,2 \text{ в} \cdot \text{с}; k = 0,33 \text{ в}^{-1};$$

$$T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; k_\varphi^* = 200; k_{\dot{\varphi}}^* = 40.$$

## **ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ (РГР)**

РГР повинна містити такі розділи:

Вступ. У вступі додається короткий опис структурної схеми і роботи замкненої системи автоматичного керування.

1. Постановка задачі.
2. Побудова математичної моделі замкненої системи автоматичного керування.
3. Побудова характеристичного рівняння замкненої системи автоматичного керування.
4. Побудова межі області стійкості замкненої системи автоматичного керування.
5. Обрання значення варійованих параметрів замкненої системи автоматичного керування.
6. Побудова перехідних процесів в замкненій системі автоматичного керування.

Висновок.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров Є. Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Том 2. Автоматичне керування рухом літальних апаратів / Є. Є. Александров, Є. П. Козлов, Б. І. Кузнецов. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – 528 с.
2. Игдалов И. М. Динамическое проектирование ракет / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун. – Днепропетровск: ДНУ, 2010. – 264 с.
3. Александров Є. Є. Основи автоматики і танкові автоматичні системи / Є. Є. Александров, М. О. Кечев, І. В. Костяник, О. Я. Ніконов. – Харків: НТУ «ХП», 2002. – 163 с.
4. Александров Е. Е. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, А. Н. Туренко и др. – Харьков: ХГАДТУ, 2001. – 642 с.
5. Александров Е. Е. Математическое моделирование, системный анализ и синтез динамических систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – 200 с.
6. Александров Є. Є. Основи автомобільної автоматики / Є. Є. Александров. – Харків: ХНАДУ, 2010. – 172 с.
7. Александров Є. Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Том 1. Теорія автоматичного керування / Є. Є. Александров, Є. П. Козлов, Б. І. Кузнецов. – Харків: НТУ «ХП», 2002. – 496 с.
8. Александрова Т. Е. Разработка инвариантного электрогидромеханического всережимного регулятора топливоподачи транспортного дизеля с электронным блоком управления / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко //

Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. – Вып.75. – с. 129–133.

9. Васильев С. К. Кибернетика в системах военного назначения / С. К. Васильев, В. Н. Захаров, Ю. Ф. Прохоров. – М.: Воениздат, 1979. – 263 с.

10. Огурк И. А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем / И. А. Огурк. – М.-Л.: Наука, 1965. – 207 с.

## ДОДАТОК А

### Програми аналізу систем автоматичного керування в пакеті MATLAB

A1. Програма побудови області стійкості балістичної ракети-носія в площині параметрів  $(k_y, k_j)$

```
M=-50;
N=-155;
app=-2;
app1=-0.003;
azz1=-10;
azd=4;
azp=-35;
apz1=-5;
apd=-1.2;
i=0;
for w=0:0.1:1.5,
    i=i+1;
    W(i)=w;
    v1=1/(M+azd*w^2);
    Ky(i)=v1*(-w^4-app*w^2);
    Ky1(i)=v1*(-azz1*w^2-N);
end
plot(Ky,Ky1)
grid on
```

A2. Програма побудови області стійкості балістичної ракети-носія в площині параметрів  $(k_\psi, k_{\dot{\psi}})$

```

M=-50;
N=-155;
app=-2;
app1=-0.003;
azz1=-10;
azd=4;
azp=-35;
apz1=-5;
apd=-1.2;
P=azz1*apd-apz1*azd;
Kz=-0.005;
Kz1=-3.5;
i=0;
for w=0.1:0.1:15,
    i=i+1;
    W(i)=w;
    del=w^4*apd^2+w^2*P^2;
    delp=w^2*(apd*(-w^4-w^2*(app+azd*Kz)-M*Kz)+P*(-
w^2*(azz1+azd*Kz1)-(N+M*Kz1)));
    delp1=w^2*apd*(-w^2*(azz1+azd*Kz1)-
(N+M*Kz1))+P*(w^4+w^2*(app+azd*Kz)+M*Kz);
    Kp(i)=delp/del;
    Kp1(i)=delp1/del;
end
W
Kp
Kp1

```

```
figure(1)
plot(Kp,Kp1)
grid on
```

A3. Програма інтегрування системи диференціальних рівнянь (68),  
(19)

```
global app azz1 azd azp apz1 apd Kz Kz1 Kp Kp1
app=-2;
azz1=-10;
azd=4;
azp=-35;
apz1=-5;
apd=-1.2;
P=azz1*apd-apz1*azd;
Kz=-0.005;
Kz1=-3.5;
Kp=40;
Kp1=0.4;
y0=[0 0 0.1 0];
Tend=20;
[t,Y]=ode45('fun_razdel_3_1',[0 Tend],y0)
figure (5)
plot(t,Y(:,1))
grid on
```

Функція правих частин програмується у файлі fun\_razdel\_3\_1.m

```
function yp=fun_razdel_3_1_(t,y)
```

```

global app azz1 azd azp apz1 apd Kz Kz1 Kp Kp1
ut=Kz*y(1)+Kz1*y(2)+Kp*y(3)+Kp1*y(4);
yp(1)=y(2);
yp(2)=azz1*y(2)+azp*y(3)+azd*ut;
yp(3)=y(4);
yp(4)=apz1*y(2)+app*y(3)+apd*ut;
yp=yp';

```

A4. Програма побудови інтервалу стійкості коефіцієнту підсилення замкненої системи керування паливоподаванням транспортного дизеля

```

Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3;
v0=1/Kz*Km*k1d;
a0=Ts*Th*T1^2*Td;
a1=T1^2*Td*(Ts+Th)+(Td*T2+T1^2)*Ts*Th;
a2=T1^2*Td+(Td*T2+T1^2)*(Ts+Th)+(Td+T2)*Ts*Th;
a3=Td*T2+T1^2+(Td+T2)*(Ts+Th)+Ts*Th;
a4=Td+T2+Ts+Th;
i=0;
for w=0.0:1:250,
    i=i+1;

```

```

W(i)=w;
REkw(i)=v0*(1-a3*w^2+a1*w^4);
IMkw(i)=v0*(a4*w-a2*w^3+a0*w^5);
end
figure(1)
REkw
IMkw
plot(REkw,IMkw)
grid on

```

A5. Програма побудови області стійкості замкненої системи керування паливоподаванням транспортного дизеля

```

global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz
Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3.5;
v0=1/(Kz*Km*k1d);
a0=Ts*Th*T1^2*Td;
a1=T1^2*Td*(Ts+Th)+(Td*T2+T1^2)*Ts*Th;
a2=T1^2*Td+(Td*T2+T1^2)*(Ts+Th)+(Td+T2)*Ts*Th;
a3=Td*T2+T1^2+(Td+T2)*(Ts+Th)+Ts*Th;
a4=Td+T2+Ts+Th;

```

```

i=0;
for w=0.0:1:250,
    i=i+1;
    W(i)=w;
    kw(i)=v0*(1-a4/Td+(a2/Td-a3)*w^2-(a0/Td-a1)*w^4);
    kh(i)=1/(Kz*Km*Td)*(a4-a2*w^2+a0*w^4);
end
figure(1)
kw
kh
plot(kw,kh)
grid on

```

А6. Програма побудови області стійкості замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати зі стабілізатором цифрового типу

```

Tp=0.315;
T1=0.00985;
T2=0.00545;
T=0.0015;
K=0.33;
Kg=1;
Kc=0.2;
i=0;
for w=0.0005:0.001:0.08,
    i=i+1;
    a1=2*w.^2./(1+w.^2);
    b1=-2*w./(1+w.^2);

```

```

a2=-4*w.^2.*(1-w.^2)./((1-w.^2).^2+4*w.^2);
b2=-8*w.^3./((1-w.^2).^2+4*w.^2);
a3=-8*w.^4.*(3-w.^2)./((1-3*w.^2).^2+w.^2.*(3-w.^2).^2);
b3=8*w.^3.*(1-3*w.^2)./((1-3*w.^2).^2+w.^2.*(3-w.^2).^2);
a4=16*w.^4.*(1-6*w.^2+w.^4)./((1-6*w.^2+w.^4).^2+16*w.^2.*(1-w.^2).^2);
b4=64*w.^5.*(1-w.^2)./((1-6*w.^2+w.^4).^2+16*w.^2.*(1-w.^2).^2);
tmp1=(T/T1)^2*b2-T2*T/T1^2*b3+b4;
kfit(i)=(Tp*T1)^2/T^3/K/Kc/b1.*tmp1;
kfi(i)=(Tp*T1)^2/T^4/K/Kg*(a1./b1.*tmp1-(T/T1)^2*a2+T2*T/T1^2*a3-a4);
end
kfi
kfit
plot(kfi,kfit)
grid on

```

А7. Програма побудови ліній рівного запасу стійкості замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля

```

% f - обозначение alfa
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz
Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3.5;

```

```

v0=1/(Kz*Km*k1d);
a0=Ts*Th*T1^2*Td;
a1=T1^2*Td*(Ts+Th)+(Td*T2+T1^2)*Ts*Th;
a2=T1^2*Td+(Td*T2+T1^2)*(Ts+Th)+(Td+T2)*Ts*Th;
a3=Td*T2+T1^2+(Td+T2)*(Ts+Th)+Ts*Th;
a4=Td+T2+Ts+Th;
f=0;
for j=1:5,
    f=f-5;
    i=0;
    for w=0.0:1:250,
        i=i+1;
        REkw(i,j)=v0*(1+a4*f+a3*(f^2-w^2)+a2*(f^3-3*f*w^2)+a1*(f^4-
6*f^2*w^2+w^4)+a0*(f^5-10*f^3*w^2+5*f*w^4));
        IMkw(i,j)=v0*(a4*w+a3*2*f*w+a2*(3*f^2*w-w^3)+a1*4*(f^2-
w^2)*f*w+a0*(w^5-10*f^2*w^3+5*f^4*w));
    end
end
figure(1)
REkw
IMkw
plot(REkw,IMkw)
grid on

```

А8. Програма побудови ліній рівного запасу стійкості замкненої системи автоматичного керування паливоподаванням транспортного дизеля в площині варійованих параметрів  $k_{\omega}$ ,  $k_h$

```

% f-- обозначение alfa
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz
Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3.5;
v0=1/(Kz*Km*k1d);
a0=Ts*Th*T1^2*Td;
a1=T1^2*Td*(Ts+Th)+(Td*T2+T1^2)*Ts*Th;
a2=T1^2*Td+(Td*T2+T1^2)*(Ts+Th)+(Td+T2)*Ts*Th;
a3=Td*T2+T1^2+(Td+T2)*(Ts+Th)+Ts*Th;
a4=Td+T2+Ts+Th;
f=0;
for j=1:5,
    f=f-5;
    i=0;
    for w=0.0:1:250,
        i=i+1;
        kh(i,j)=1/(Kz*Km*Td)*(a4+2*a3*f+a2*(3*f^2-w^2)+4*a1*(f^2-
w^2)*f+a0*(w^4-10*f^2*w^2+5*f^4));
        v1=a1*(f^4-6*f^2*w^2+w^4)+a0*(f^5-10*f^3*w^2+5*f*w^4);
        kw(i,j)=v0*(-Km*Kz*(1+Td*f)*kh(i,j)+1+a4*f+a3*(f^2-w^2)+a2*(f^3-
3*f*w^2)+v1);

```

```
end
end
figure(1)
kw
kh
plot(kw,kh)
grid on
```

A9. Програма інтегрування системи диференціальних рівнянь (125),  
(69)

```
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz Kw
Kw=13.1;
Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3.5;
y0=[0.1 0 0 0 0];
Tend=1;
[t,Y]=ode45('fun_razdel_3_2',[0 Tend],y0)
figure (5)
plot(t,Y(:,1))
grid on
```

Функція правих частин програмується у файлі fun\_razdel\_3\_2.m

```
function yp=fun_razdel_3_2(t,y)
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz Kw
ut=Kw*y(1);
yp(1)=-1/Td*y(1)+k1d/Td*y(5);
yp(2)=y(3);
yp(3)=(-y(2)-T2*y(3)+Km*ut)/T1^2;
yp(4)=-1/Ts*y(4)+1/Ts*y(2);
yp(5)=(Kz*y(4)-y(5))/Th;
yp=yp';
```

A10. Програма інтегрування системи диференціальних рівнянь (125),

(82)

```
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz Kw Kh
Kw=12;
Kh=13;
Td=0.3;
k1d=-1000;
T1=0.004;
T2=0.00015;
Ts=0.005;
Th=0.006;
Km=0.001;
Kz=3.5;
y0=[0.1 0 0 0 0];
Tend=1;
[t,Y]=ode45('fun_razdel_3_3',[0 Tend],y0)
```

```
figure (5)
plot(t,Y(:,1))
grid on
```

Функція правих частин програмується у файлі fun\_razdel\_3\_3.m

```
function yp=fun_razdel_3_3(t,y)
global Td T1 T2 Ts Th k1d Km Kz Kw Kh
ut=Kw*y(1)+Kh*y(5);
yp(1)=-1/Td*y(1)+k1d/Td*y(5);
yp(2)=y(3);
yp(3)=(-y(2)-T2*y(3)+Km*ut)/T1^2;
yp(4)=-1/Ts*y(4)+1/Ts*y(2);
yp(5)=(Kz*y(4)-y(5))/Th;
yp=yp';
```

A11. Програма інтегрування системи диференціальних рівнянь (130)

```
global Tp T1 T2 K Kg Kc Kfi Kfit
Kfi=200;
Kfit=40;
Tp=0.315;
T1=0.00985;
T2=0.00545;
% T=0.0015;
K=0.33;
Kg=1;
Kc=0.2;
y0=[0.1 0 0 0];
Tend=1;
```

```
[t,Y]=ode45('fun_razdel_4_3',[0 Tend],y0)
```

```
figure (5)
```

```
plot(t,Y(:,1))
```

```
grid on
```

Функція правих частин програмується у файлі fun\_razdel\_4\_3.m

```
function yp=fun_razdel_4_3(t,y)
```

```
global Tp T1 T2 K Kg Kc Kfi Kfit
```

```
ut=Kfi*Kg*y(1)+Kfit*Kc*y(2);
```

```
yp(1)=y(2);
```

```
yp(2)=-1/Tp^2*y(3);
```

```
yp(3)=y(4);
```

```
yp(4)=-1/T1^2*y(3)-T2/T1^2*y(4)+K/T1^2*ut;
```

```
yp=yp';
```



Навчальне видання

АЛЕКСАНДРОВА Тетяна Євгенівна  
КОСТЯНИК Ірина Віталіївна

## **АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ В ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ**

Навчально-методичний посібник  
до виконання розрахунково-графічної роботи  
для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування»  
спеціалізацій «Транспортні засоби високої прохідності» та  
«Мехатронні системи транспортних засобів»

Роботу до видання рекомендував д-р техн. наук, проф. Д. О. Волонцевич  
Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. В. В. Дущенко

В авторській редакції

План 2018 р., поз. 148

Підписано до друку 24.11.2018.

Гарнітура Times New Roman.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5478 від 21.08.2017 р.

---

Самостійне електронне видання