Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп’ютерно-інтегрованих технологій

04-03-419М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи
з навчальної дисципліни «**Теорія автоматичного керування**»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
денної та заочної форми навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІ ЕАВГ
Протокол № 4 від 17.12.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного керування» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Кінчур О. Ф. – Рівне : НУВГП, 2024. – 17 с.

Укладач:
Кінчур О. Ф., старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп’ютерно–інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск:
Древецький В. В., завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп’ютерно–інтегрованих технологій, доктор технічних наук, професор.

Керівник групи забезпечення спеціальності 174 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»:
Христюк А. О., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп’ютерно-інтегрованих технологій, кандидат технічних наук, доцент.

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки складені відповідно до чинного силабусу навчальної дисципліни «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

Мета даного навчального видання - допомогти студентам в освоєнні методів аналізу та синтезу систем автоматичного керування та надбанні необхідних практичних навичок в дослідженні типових систем керування.

Виконання самостійної роботи сприятиме закріпленню, поглибленню та узагальненню теоретичних основ курсу, а також сприятиме розвитку навичок самостійної творчої роботи студентів у процесі їх навчання.

Методичні вказівки містять стислі теоретичні відомості про динамічні характеристики систем автоматичного керування, завдання для самостійної роботи зі схемами, математичним описом та варіантами значень параметрів.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Основні характеристики елементів та систем автоматичного керування

Рівняння динаміки елементу системи автоматичного керування (САК) - це диференційне рівняння, що визначає залежність вихідної величини $Y(t)$ елементу від його вхідної величини $X(t)$ і часу.

Для заданого чи визначеного рівняння динаміки елементу САК, що описує залежність вихідної величини елементу від вхідної, передатна функція ланки $W(p)$ визначається за допомогою перетворення Лапласа за нульових початкових умов.

Передатна функція ланки (системи) $W(p)$ визначається як відношення зображень за Лапласом вихідної $Y(t)$ і вхідної $X(p)$ величин за нульових початкових умов:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \qquad (1)$$

тобто передатна функція визначається із рівняння ланки, записаного в операторній формі. Якщо елемент системи має дві вхідних величини, необхідно визначити дві передатні функції (за кожним входом).

<u>Ваговою функцією</u> ω(t) називається реакція елемента (системи) на одиничний імпульс $\delta(t)$ на вході елемента (системи), тобто на миттєвий імпульс нескінченно великої амплітуди і одиничної площі. Щоб отримати вагову функцію ω(t), необхідно визначити оригінал (обернене перетворення Лапласа), що відповідає передатній функції:

$$\omega(t) = L^{-1}\{W(p)\}, \qquad (2)$$

де $L^{-1}\{\ \}$ знак оберненого перетворення Лапласа.

<u>Перехідною функцією</u> елемента (системи) *h(t)* називається реакція елемента (системи) на одиничну ступінчасту дію, тобто перехідна функція визначається як процес на виході *h(t)=Y(t)* за одиничного стрибка на вході *X(t)=1[t]*. Перехідна функція *h(t)* визначається як обернене перетворення Лапласа (тобто оригінал) від зображення *W(p)/p*, тобто:

$$h(t) = L^{-1}\left\{\frac{W(p)}{p}\right\}. \qquad (3)$$

<u>Комплексною передатною функцією</u> (КПФ) ланки (системи) називається відношення комплексного зображення вихідної величини *Y(jω)* до комплексного зображення вхідної величини *X(jω)* в режимі усталених гармонічних коливань:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \qquad (4)$$

де *P(ω)* та *Q(ω)* - відповідно дійсна та уявна частини КПФ у алгебраїчному поданні; *A(ω)* та *φ(ω)* - відповідно модуль та аргумент КПФ у показниковому поданні.

Амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) ланки (системи) називається крива залежності модуля КПФ $A(\omega)$ від частоти при змінюванні частоти від 0 до ∞.

Фазочастотною характеристикою (ФЧХ) ланки (системи) називається крива залежності аргументу КПФ $\varphi(\omega)$ від частоти при змінюванні частоти від 0 до ∞.

1.2. Передатні функції систем автоматичного керування

Передатна функція розімкненої системи $W_{роз}(p)$ дорівнює добутку передатних функцій всіх елементів, що входять до замкненого контуру:

$$W_{роз}(p) = W_{пр}(p)\, W_{зз}(p), \qquad (5)$$

де $W_{пр}(p)$ — передатна функція ланок у прямому зв‘язку; $W_{ЗЗ}(p)$- передатна функція ланок у зворотному зв‘язку.

Для системи з одиничним зворотним зв'язком ($W_{ЗЗ}(p)$ =1):

$$W_{роз}(p) = W_{пр}(p). \qquad (6)$$

Після визначення передатної функції розімкненої системи можна знайти передатні функції замкненої системи :

• за вхідним діянням:

$$W_з(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{W_{пр}(p)}{1 + W_{пр}(p) W_{зз}(p)} = \frac{W_{пр}(p)}{1 + W_{роз}(p)}, \qquad (7)$$

або для $W_{ЗЗ}(p) = 1$:

$$W_з(p) = \frac{W_{роз}(p)}{1 + W_{роз}(p)}; \qquad (8)$$

- за помилкою системи:

$$W_\delta(p) = \frac{\delta(p)}{x(p)} = \frac{1}{1 + W_{роз}(p)}; \qquad (9)$$

- за збуренням:

$$W_з^f(p) = \frac{y(p)}{f(p)} = \frac{W_f(p)}{1 + W_{роз}(p)}. \qquad (10)$$

Вирази (7)-(10) мають однакові знаменники, які визначають характеристичне рівняння $D(p)$ замкненої системи. Якщо передатну функцію розімкненої системи в загальному випадку записати у вигляді:

$$W_{роз}(p)=\frac{R(p)}{Q(p)},$$

то для отримання характеристичного рівняння слід до знаменника передатної функції розімкненої системи додати її чисельник:

$$D(p)=R(p)+Q(p).$$

1.3. Побудова асимптотичних логарифмічних частотних характеристик розімкненої системи

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) розімкненої системи визначається як:

$$L(\omega)=20\lg A(\omega)=\sum_{i=1}^{n} L_i(\omega), \qquad (11)$$

де $L_i(\omega)$ - ЛАЧХ і-тої ланки системи.

Одиницею виміру $L_i(\omega)$ є децибел (відкладаємо на осі ординат), а на осі абсцис відкладається частота ω [$с^{-1}$] в логарифмічному масштабі.

Вираз для логарифмічної фазочастотної характеристики (ЛФЧХ) також запишемо у вигляді алгебраїчної суми:

$$\varphi(\omega)=\sum_{i=1}^{n} \varphi_i(\omega), \qquad (12)$$

де $\varphi_i(\omega)$ - ЛФЧХ i-тої ланки.

При побудові ЛФЧХ відлік кутів $\varphi(\omega)$ іде за віссю ординат в звичайному масштабі в кутових градусах чи радіанах. За віссю абсцис відкладається частота в логарифмічному масштабі.

Характеристики $L(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ будують на одному бланку, причому $\varphi(\omega)$ розташовують точно під $L(\omega)$.

ЛАЧХ і ЛФЧХ можна побудувати безпосередньо за заданою передатною функцією, використовуючи відомі асимптотичні характеристики окремих елементів.

Розглянемо методику побудови <u>асимптотичних характеристик</u> (рис.1).

1. Визначити частоти спряження ω_1 і, ω_2,... ω_n, де $\omega_i=1/T_i$, відкласти їх значення вздовж осі частот.
2. На частоті $\omega=1$ відкласти ординату, яка дорівнює $20lgK_{роз}$, де $K_{роз}$ - коефіцієнт підсилення розімкненої системи, позначивши дану точку A.
3. Через точку A провести пряму з нахилом (-υ и 20 дБ/дек), де υ - порядок астатизму системи, від осі ординат до першої частоти спряження. Даний відрізок є низькочастотною асимптотою ЛАЧХ. Якщо перша частота спряження менша за одиницю (тобто лежить зліва від частоти $\omega=1$ на осі частот), то через точку A пройде продовження низькочастотної асимптоти.
4. Після кожної частоти спряження ω_i необхідно змінювати нахил ЛАЧХ:

- на (- 20 дБ/дек), якщо частота спряження визначається сталою часу ланки першого порядку типу $(Tp+1)$ в знаменнику $W_{роз}(p)$;

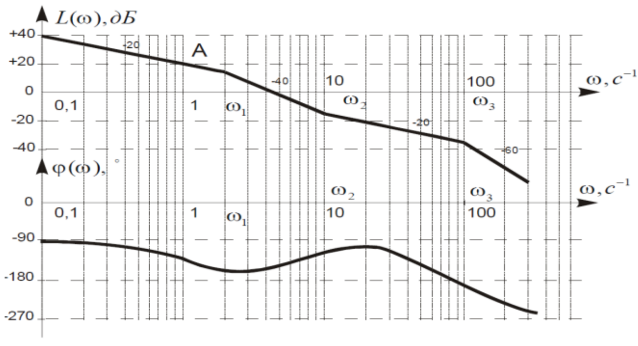

Рис. 1. Приклад побудови асимптотичних логарифмічних частотних характеристик розімкненої системи.

- на (+20 дБ/дек), якщо частота спряження визначається сталою часу ланки того ж типу в чисельнику $W_{роз}(p)$;

- для ланок другого порядку (аперіодична другого порядку, коливальна) нахил змінюється на (± 40 дБ/дек) (знак "+" , якщо ланка знаходиться в чисельнику $W_{роз}(p)$, а знак "-", якщо в знаменнику).

1.4. Стійкість лінійних САК

Стійкість системи - це її властивість повертатись у початковий стан після зняття збурення, яке вивело систему із цього стану. Під час аналізу САК в першу чергу визначають її стійкість, а під час синтезу обов’язково вживають заходи із забезпечення стійкості.

Найчастіше визначають стійкість лінійних САК за коренями характеристичного рівняння, за алгебраїчними критеріями (Гурвіца, Рауса), за частотними критеріями (Михайлова, Найквіста, з використанням логарифмічних характеристик).

Визначати стійкість за коренями характеристичного рівняння доцільно у випадку низького порядку системи та коли в подальшому необхідно знаходити кореневі показники якості чи виконувати синтез системи за кореневим методом. Лінійна САК стійка, якщо всі корені її характеристичного рівняння мають від’ємні дійсні частини.

Алгебраїчні критерії стійкості використовують для аналізу лінійних систем високого порядку.

За критерієм Гурвіца система буде стійкою, якщо в характеристичному рівнянні системи

$$a_n p^n + a_{n-1} p^n - 1 + a_{n-2} p^{n-2} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (13)$$

коефіцієнт $a_{n-1}>0$ і всі визначники Δ_i, одержані з матриці Гурвіца, будуть додатними. Матриця Гурвіца - це квадратна матриця розмірністю $n \times n$, яка формується із коефіцієнтів a_i характеристичного рівняння:

$$\begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & \ldots & a_2 & a_0 \end{vmatrix} \qquad (14)$$

Визначник Δ_i обчислюють для матриць, які одержують шляхом послідовного викреслювання останнього рядка і останнього стовпчика матриці вищої розмірності:

$$\Delta_n = \det \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & \ldots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & \ldots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & \ldots & a_2 & a_0 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{n-1} = \det \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & \ldots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & \ldots & a_3 & a_1 \end{vmatrix} \ldots$$

$$\Delta_3 = \det \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}; \; \Delta_2 = \det \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}; \; \Delta_1 = a_{n-1}.$$

1.5 Показники якості роботи лінійних САК

Якість роботи лінійних САК оцінюють за допомогою прямих, частотних, кореневих, інтегральних показників якості. Прямі показники якості визначають за графіком перехідного процесу; такий спосіб є простим, наглядним і має задовільну точність. На рисунку 2 наведено типовий коливальний перехідний процес і виконано додаткові побудови для визначення прямих показників якості.

1. Час регулювання (тривалість перехідного процесу) t_p визначається як час від початку процесу до моменту, після якого функція h(t) уже не буде відхилятись від усталеного значення $h_{уст}$ на величину, більшу ніж задана похибка Δ. Якщо Δ не задана, то її приймають $\Delta = 0{,}05h_{уст}$.

2. Перерегулювання σ характеризує максимальне відхилення $h(t)$ від усталеного режиму виражене у відсотках:

$$\sigma = \frac{h_m - h_{уст}}{h_{уст}} \times 100\% \cdot$$

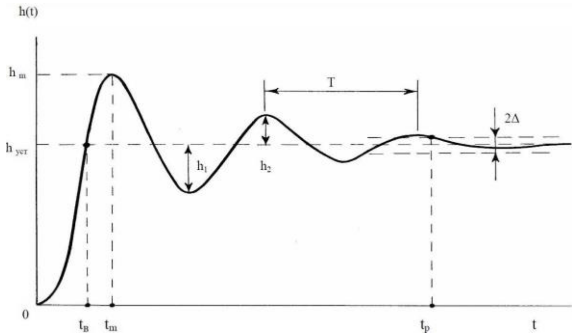

Рис. 2. Визначення прямих показників якості лінійних САК

3. Час виходу на режим t_B – час від початку процесу до першого досягнення ним значення $h_{уст}$.
4. Час досягнення першого максимуму t_M.
5. Період коливань T.
6. Кількість коливань N за час регулювання.
7. Декремент згасання χ характеризує інтенсивність зменшення амплітуди коливань

$$\chi = \frac{h_1}{h_2} \cdot$$

Іноді визначають логарифмічну міру згасання $d = \ln \chi$.

2. ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАВДАННЯ 1

Одержати передатну функцію для схеми, зображеної на рис.3, відповідно до номеру варіанта.

Необхідно побудувати зазначені характеристики (див. табл.1):

– амплітудно-частотну (АЧХ),
– фазову частотну (ФЧХ),
– амплітудно-фазову (АФХ),
– перехідну (ПХ),
– імпульсну перехідну (ІПХ).

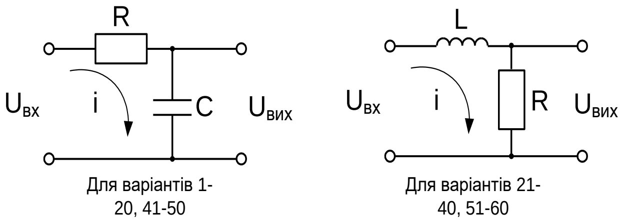

Рис.3.

Таблиця 1

№ вар.	R, Ом	C, мкФ	№ вар.	R,Ом	L,Гн
1	1000	1000	21	1,0	0,20
2	1100	1000	22	1,2	0,20
3	1200	1000	23	1,5	0,20
4	1300	1000	24	1,6	0,20
5	1400	1000	25	2,0	0,20
6	1500	1000	26	2,0	0,25
7	1600	1000	27	2,5	0,25
8	1800	1000	28	4,0	0,25
9	2000	1000	29	5,0	0,25
10	500	2000	30	7,5	0,25
11	550	2000	31	5,8	0,30
12	600	2000	32	4,2	0,30
13	700	2000	33	3,2	0,30

14	750	2000	34	1,8	0,30
15	800	2000	35	5,8	0,30
16	600	1500	36	6,0	0,20
17	700	1500	37	7,5	0,20
18	800	1500	38	6,0	0,15
19	1000	1500	39	8,0	0,15
20	1200	1500	40	12,0	0,15
41	1000	1000	51	1,0	0,30
42	1100	1000	52	1,2	0,30
43	1200	1000	53	1,5	0,30
44	750	2000	54	2,0	0,30
45	400	1500	55	5,4	0,25
46	700	2000	56	7,5	0,25
47	500	2000	57	4,0	0,25
48	600	1500	58	6,5	0,30
49	1200	1500	59	6,2	0,30
50	1500	1000	60	3,6	0,30

ЗАВДАННЯ 2

Знайти передатну функцію з'єднання ланок. Структурні схеми для різних варіантів наведені на рис. 4, а передатні функції окремих ланок – у табл. 2.

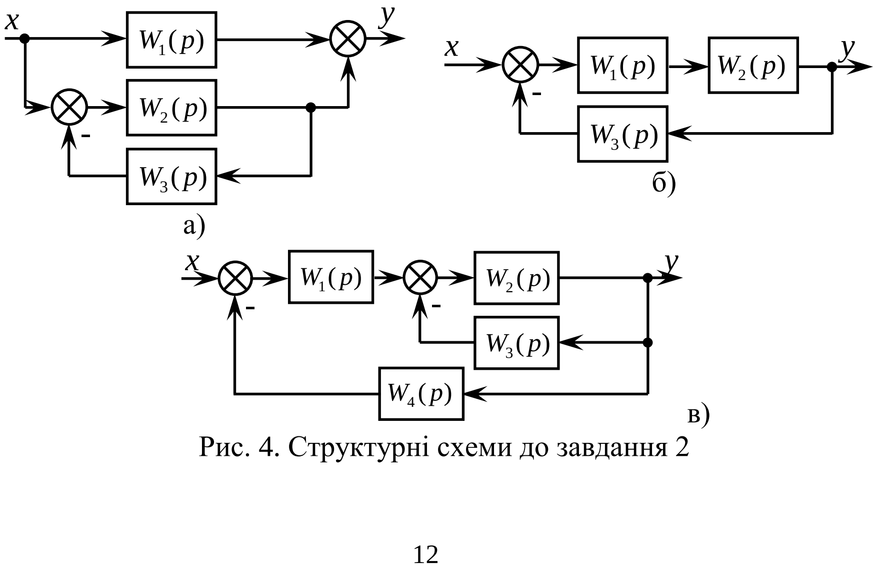

Рис. 4. Структурні схеми до завдання 2

Таблиця 2

Варіант завдання	Передатні функції				Структурна схема
	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	
1, 31	3/ (0.2p+1)	2/p	0.5	-	Рис. 4, *а*
2, 32	1/ (0.1p+1)	3/p	1.2	-	
3, 33	3/ (0.2p+1)	1/p	3.2	-	
4, 34	1/ (0.3p+1)	2/p	0.5	-	
5, 35	1/p	1/p	0.7	-	
6, 36	2/ (0.2p+1)	1(0.1p+1)	0.2	-	
7, 37	1/ (0.2p+1)	(0.2p+1)	0.5	-	
8, 38	2/p	(0.5p+1)	0.5	-	
9, 39	3/ (0.3p+1)	5/p	0.7	-	
10, 40	1/ (0.2p+1)	6/p	1.5	-	
11, 41	3/ (0.2p+1)	5/p	0.2	-	Рис. 4, *б*
12, 42	1/p	0.5	0.5	-	
13, 43	0.2/p	0.5/(0.2p+1)	1.0	-	
14, 44	1/ (p+1)	0.5/p	2.5	-	
15, 45	2/p	0.5/(p+1)	2.0	-	
16, 46	1/p	2/ (p+1)	0.5	-	
17, 47	0.5/p	1/ (p+1)	0.5	-	
18, 48	10/p	0.5/(2p+1)	0.7	-	
19, 49	9/ (0.1p+1)	5/p	1.2	-	
20, 50	2/p	0.5	0.2	-	
21, 51	4/p	0.2/p	0.1	1.0	Рис. 4, *в*

Варіант завдання	Передатні функції				Структурна схема
	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	
22, 52	*1/p*	*3/p*	*2.0*	*0.5*	
23, 53	*2.0*	*1/ (p+1)*	*2.0*	*0.5*	
24, 54	*5/ (p+1)*	*5/p*	*1.0*	*p+1*	
25, 55	*5/ (p+2)*	*2/p*	*2.0*	*P+2*	
26, 56	*4/p*	*05/p*	*0.2*	*2.0*	
27, 57	*5.0*	*0.2/(p+1)*	*1.0*	*0.5*	
28, 58	*2/p*	*0.2/p*	*0.2*	*1.0*	
29, 59	*5/p*	*0.2/p*	*0.5*	*1.0*	
30, 60	*4/p*	*3/p*	*5.0*	*0.5*	

ЗАВДАННЯ 3

Побудувати асимптотичну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику для системи автоматичного регулювання в розімкнутому стані. Передатні функції системи і її параметри наведені в табл. 3.

Таблиця 3

<table>
<tr><th rowspan="2">Варіант</th><th rowspan="2">Передатні функції</th><th colspan="4">Значення параметрів</th></tr>
<tr><th>T_1, с</th><th>T_2, с</th><th>T_3, с</th><th>K</th></tr>
<tr><td>1, 31</td><td rowspan="4">$W(p)=\dfrac{K}{p(T_1p+1)(T_2p+1)}$</td><td>0.10</td><td>0.2</td><td>-</td><td rowspan="4">20</td></tr>
<tr><td>2, 32</td><td>0.20</td><td>0.2</td><td>-</td></tr>
<tr><td>3, 33</td><td>0.40</td><td>0.6</td><td>-</td></tr>
<tr><td>4, 34</td><td>0.30</td><td>0.4</td><td>-</td></tr>
<tr><td>5, 35</td><td rowspan="4">$W(p)=\dfrac{K}{p(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)}$</td><td>0.10</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td rowspan="4">30</td></tr>
<tr><td>6, 36</td><td>0.20</td><td>0.6</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>7, 37</td><td>0.20</td><td>0.2</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>8, 38</td><td>0.20</td><td>0.3</td><td>0.4</td></tr>
<tr><td>9, 39</td><td rowspan="3">$W(p)=\dfrac{K}{p(T_2^2p^2+T_1p+1)}$</td><td>0.10</td><td>0.2</td><td>-</td><td rowspan="3">40</td></tr>
<tr><td>10, 40</td><td>0.60</td><td>0.3</td><td>-</td></tr>
<tr><td>11, 41</td><td>0.50</td><td>0.2</td><td>-</td></tr>
</table>

Варіант	Передатні функції	Значення параметрів			
		T_1, с	T_2, с	T_3, с	K
12, 42		0.40	0.1	-	
13, 43	$W(p)=\dfrac{K}{p(T_1 p+1)^2}$	0.10	-	-	50
14, 44		0.20	-	-	
15, 45		0.30	-	-	
16, 46		0.15	-	-	
17, 47	$W(p)=\dfrac{K}{p(T_2 p+1)^3}$	-	0.2	-	50
18, 48		-	0,6	-	
19, 49		-	0.4	-	
20, 50		-	0.8	-	
21, 51	$W(p)=\dfrac{K(T_1 p+1)}{p(T_2 p+1)^2}$	0.10	0.5	-	40
22, 52		0.10	0.5	-	
23, 53		0.05	0.5	-	
24, 54		1.00	6.0	-	
25, 55	$W(p)=\dfrac{K}{p(T_1 p+1)(T_2 p+1)}$	0.10	0.4	-	30
26, 56		0.20	0.6	-	
27, 57		0.05	0.4	-	
28, 58	$W(p)=\dfrac{Kp}{(T_1 p+1)^3}$	0.40	-	-	20
29, 59		0.60	-	-	
30, 60		0.80	-	-	

ЗАВДАННЯ 4

Дослідити на стійкість систему, структурна схема якої представлена у на рис 5. Дослідження провести за коренями характеристичного рівняння, а також за допомогою алгебраїчного критерію стійкості Гурвіца. Порівняти результати.

Дані для розрахунків в таблиці 4.

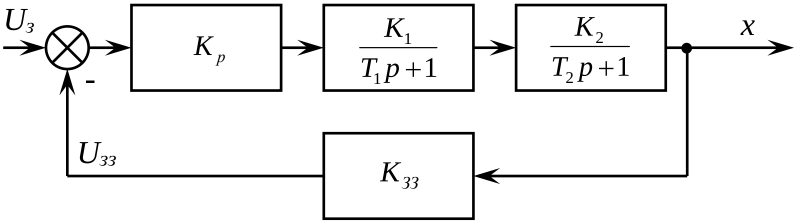

Рис.5.

Таблиця 4.

№вар.	$К_р$	$К_1$	$Т_1$	$К_2$	$Т_2$	$К_{ЗЗ}$	№вар.	$К_р$	$К_1$	$Т_1$	$К_2$	$К_{ЗЗ}$
1	8	1,2	0,08	2,2	0,12	0,33	31	15	1,6	0,16	2,8	0,15
2	10	1,25	0,09	2,3	0,13	0,25	32	16	1,7	0,15	3,0	0,12
3	12	1,3	0,1	2,4	0,14	0,4	33	18	1,75	0,18	3,2	0,16
4	12,5	1,4	0,12	2,5	0,15	0,5	34	20	1,8	0,19	3,3	0,5
5	14	1,5	0,14	2,6	0,16	0,2	35	22	1,9	0,2	3,4	0,4
6	15	1,6	0,16	2,8	0,18	0,15	36	24	2,0	0,18	3,5	0,33
7	16	1,7	0,15	3,0	0,2	0,12	37	14	2,4	0,11	4,3	0,2
8	18	1,75	0,18	3,2	0,22	0,16	38	15	2,45	0,14	4,4	0,25
9	20	1,8	0,19	3,3	0,24	0,5	39	16	2,5	0,15	4,5	0,12
10	22	1,9	0,2	3,4	0,25	0,4	40	18	2,6	0,16	4,6	0,14
11	24	2,0	0,18	3,5	0,24	0,33	41	20	2,65	0,18	4,7	0,16
12	25	2,1	0,16	3,6	0,22	0,2	42	14	2,7	0,22	4,8	0,18
13	26	2,2	0,15	3,8	0,21	0,25	43	8	1,2	0,08	2,2	0,33
14	12	2,3	0,14	4,0	0,2	0,24	44	10	1,25	0,09	2,3	0,25
15	12,5	2,25	0,12	4,2	0,18	0,22	45	12	1,3	0,1	2,4	0,4
16	14	2,4	0,11	4,3	0,16	0,2	46	12,5	1,4	0,12	2,5	0,5
17	15	2,45	0,14	4,4	0,16	0,25	47	14	1,5	0,14	2,6	0,2
18	16	2,5	0,15	4,5	0,15	0,12	48	14	2,7	0,22	4,8	0,18
19	18	2,6	0,16	4,6	0,14	0,14	49	16	2,75	0,24	5,0	0,15
20	20	2,65	0,18	4,7	0,12	0,16	50	18	2,8	0,25	5,2	0,22
21	14	2,7	0,22	4,8	0,11	0,18	51	20	2,85	0,26	5,4	0,25
22	16	2,75	0,24	5,0	0,08	0,15	52	22	3,0	0,28	5,5	0,28
23	18	2,8	0,25	5,2	0,06	0,22	53	24	3,2	0,32	5,6	0,3
24	20	2,85	0,26	5,4	0,07	0,25	54	20	1,7	0,08	2,2	0,32
25	22	3,0	0,28	5,5	0,05	0,28	55	15	1,9	0,1	3,3	0,28
26	24	3,2	0,32	5,6	0,09	0,3	56	18	2,1	0,12	5,2	0,17

$№_{вар.}$	$К_р$	$К_1$	$Т_1$	$К_2$	$Т_2$	$К_{ЗЗ}$	$№_{вар.}$	$К_р$	$К_1$	$Т_1$	$К_2$	$К_{ЗЗ}$
27	20	1,7	0,08	2,2	0,12	0,32	57	22	2,7	0,15	4,0	0,3
28	15	1,9	0,1	3,3	0,17	0,28	58	22	1,9	0,2	3,4	0,4
29	18	2,1	0,12	5,2	0,14	0,17	59	24	2,0	0,18	3,5	0,33
30	22	2,7	0,15	4,0	0,16	0,3	60	25	2,1	0,16	3,6	0,2

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Зайцев Г. Ф., Стеклов В. К., Бріцький О. І. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. Київ : Техніка, 2002. 688 с.
3. Харабет О. Н. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера. Одеса : Бахва, 2014. 187 с.
4. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. 250 с.
5. Голюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2012. 280 с.
6. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 210 с.