

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Автоматизація та управління енергоустановками з
відновлюваними джерелами енергії:
розрахункова робота**

*для студентів усіх форм навчання
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітньо-професійна програма «Нетрадиційні та
відновлювані джерела енергії»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Автоматизація та управління енергоустановками з відновлюваними джерелами енергії: розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Укладачі: Головка В.М., Коваленко І.Я., -Електронні текстові дані (1 файл: 600 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 19с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 02.06.2023 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та
автоматики (протокол № 11 від 29.05.2023р.)*

Укладачі: **Головка Володимир Михайлович, д-р техн. наук, проф.**
Коваленко Ірина Яківна, асистент

Відповідальний
редактор: **Будько Василь Іванович, д-р техн. наук, доц.**

Рецензент: **Пушкар Микола Васильович, канд.техн.наук, доц.**

ЗМІСТ

Вступ	4
Структура розрахункової роботи.....	5
Рекомендації до виконання розрахункової роботи.....	6
Порядок виконання розрахункової роботи.....	6
Порядок захисту роботи.....	11
Література.....	12
Додатки.....	13

ВСТУП

Вивчення курсу «Системи автоматизації та управління енергоустановками з відновлюваними джерелами енергії» як технічної дисципліни має:

- забезпечення формування у студентів, які здобувають вищу освіту, знань стосовно систем автоматичного управління установок відновлюваних джерел енергії;
- підготувати спеціалістів до використання в практичній діяльності отриманих знань для забезпечення виконання експлуатаційних режимів систем автоматичного управління установками відновлюваних джерел енергії;
- навчити майбутніх інженерів здійснювати пошук раціональних рішень при створенні систем автоматичного управління технологічних процесів відновлюваної енергетики, формування нетрадиційних підходів до енергозбереження, захисту навколишнього середовища.

В процесі навчання студенти повинні здобути знання із:

- знати сутність процесу регулювання, призначення, склад, принцип дії АС; особливості енергоустановок як об'єктів регулювання; особливості методів дослідження;
- розуміти характеристики САУ та їхніх елементів;
- мати уяву про методи дослідження, задачі та перспективи розвитку систем автоматичного управління.

Під час вивчення дисципліни студенти повинні набути відповідні навички та вміння роботи із спеціальною літературою та електронними засобами інформації.

З метою практичного набуття студентами вміння працювати із енергетичними установками передбачається виконання розрахункової роботи. Основною ціллю роботи є навчання студентів за заданою структурною схемою автоматичної системи і диференційними рівняннями динамічних ланок дослідити стійкість системи та величину усталеної похибки за вхідної гармонійної дії.

Навчальною основою при підготовці студентів до виконання розрахункової роботи є електронний конспект лекцій з дисципліни «Автоматизація та управління енергоустановками з відновлюваними джерелами енергії», а також інші джерела, що наведені в даному посібнику.

Вивчення дисциплін «Автоматизація та управління енергоустановками з відновлюваними джерелами енергії» та виконання розрахункової роботи є обов'язковою частиною підготовки фахівця-електроенергетика сучасного рівня, здатного вирішувати конкретні питання розробки, проектування, експлуатації та діагностики електроустаткування установок відновлюваної енергетики.

Структура розрахункової роботи.

Загальні положення. Студент повинен виконати варіант контрольної роботи за своїм номером шифру. Порядок вибору варіанта вказаний в завданні на контрольну роботу.

Вимоги до контрольної роботи. Робота присвячена дослідженню стійкості багатоконтурній системі автоматичного керування (САК) та аналізу якості регулювання САК.

1. Для системи автоматичного керування, структурна схема якої у відповідності з номером варіанта вибирається студентом з табл.1 і 2 (Додатки), визначити передаточні функції ланок САК і вказати, якими динамічними ланками є кожна з них.
2. Скласти характеристичне рівняння замкнутої системи та, використовуючи алгебраїчний критерій, дослідити стійкість. Визначити граничне значення передаточного коефіцієнта $K_{гр}$.
3. Дослідити стійкість системи, використовуючи критерій стійкості Михайлова. Визначити граничне значення передаточного коефіцієнта ($K_{гр}$) та порівняти його з $K_{гр}$, що отриманий при виконанні п.2.
4. Визначити величину усталеної похибки при дії

$$q(t) = I \cdot(t) \text{ та } q(t) = A \cdot \sin \omega t ,$$

де $A = 10$ – амплітуда вхідної гармонійної дії;

$\omega = 2 \text{ c}^{-1}$ – частота.

Вибір варіанта. Остання цифра номеру залікової книжки відповідає номеру варіанта при виборі структурної схеми з табл.1. Передостання цифра номеру залікової книжки відповідає номеру варіанта при виборі диференціальних рівнянь ланок з табл.2 для своєї структурної схеми.

Рекомендації до виконання розрахункової роботи:

- виконання п.1 завдання треба починати з визначення передаточних функцій ланок САК за їхніми диференціальними рівняннями. Завершується виконання п.1 побудовою структурної схеми з передаточними функціями ланок, що знайдені;
- для складання характеристичного рівняння необхідно перетворити структурну схему та визначити передаточну функцію замкненої системи $W_{\text{зам}}(p)$. Послідовність перетворення схеми повинна бути наведена в роботі. Рекомендується позбавитися перехресних зв'язків в багатоконтурній САК шляхом використання правил переносу та перестановки вузлів і суматорів. Потім, за допомогою правил перетворення структурних схем, перетворити вихідну багатоконтурну схему в одноконтурну. Всі обчислення, що пов'язані з визначенням $W_{\text{зам}}(p)$, проводити в загальному вигляді;
- граничне значення передаточного коефіцієнта системи $K_{\text{гр}}$ визначається з умови, коли система знаходиться на межі стійкості;
- порівняти результати п.2 та п.3 контрольного завдання. Якщо вони не співпадають, то необхідно шукати помилку.
- для обчислення усталеної похибки визначають передаточну функцію відносно похибки:

$$W_{\Delta X(p)} = 1 - W_{\text{зам}}(p) = 1 / 1 + W_{\text{роз}}(p)$$

Формула для визначення усталеної похибки за дією $q(t) = 1 \cdot (t)$:

$$\Delta X_{\text{уст}} = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{\Delta X(p)} \cdot X_{\text{вх}}(p).$$

$$p \rightarrow 0$$

Для типової дії $q(t) = 1 \cdot (t)$ зображення за Лапласом $X_{ex}(p) = 1/p$.

Для розрахунку похибки при $q(t) = A \cdot \sin \omega t$ – використати наближений вираз:

$$X_{max} \approx A/A(\omega_K)$$

Порядок виконання розрахункової роботи.

Дана структурна схема системи автоматичного керування (рис.1) та диференційне рівняння ланок.

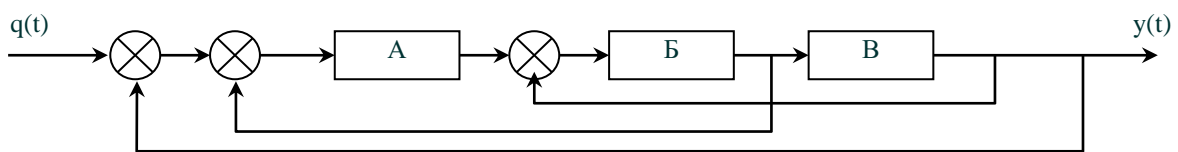


Рисунок 1.

Ланка А: $T_2 \frac{d^2 y}{dt} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = Kx$

$$K = 5,0; \quad T_1 = 1,0; \quad T_2 = 0,05.$$

Ланка Б: $T_1 \frac{dy}{dt} + y = T_2 \frac{dx}{dt} + Kx$

$$K = 10; \quad T_1 = 1,0; \quad T_2 = 15.$$

Ланка В: $T \frac{dy}{dt} + y = Kx$

$$K = 1,5; \quad T = 0,5.$$

Розв'язок.

І. 1. Ланка А є аперіодичною ланкою 2-го порядку. Її передаточна функція:

$$W_1(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{5}{(0,05)^2 p^2 + 1p + 1}.$$

2. Ланка Б є інтегрально-диференційною (гнучкою з естатизмом) ланкою. Її передаточна функція:

$$W_2(p) = \frac{K + T_2 p}{T_1 p + 1} = \frac{10 + 15p}{1 + p}.$$

3. Ланка B є аперіодичною ланкою 1-го порядку. Її передаточна функція:

$$W_3(p) = \frac{K}{Tp + 1} = \frac{1,5}{0,5p + 1}.$$

Структурна схема системи наведена на рис.2.

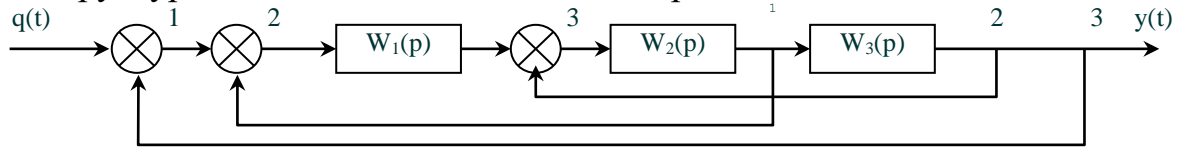


Рисунок 2.

II. Для того щоб застосувати правила перетворення структурних схем, необхідно структурну схему, що зображена на рис.2, перетворити. З цією метою переносимо вузол 1 через ланку, передаточна функція якої $W_3(p)$, та вузол 2 (рис.3). Структурна схема має три розв'язаних контури.

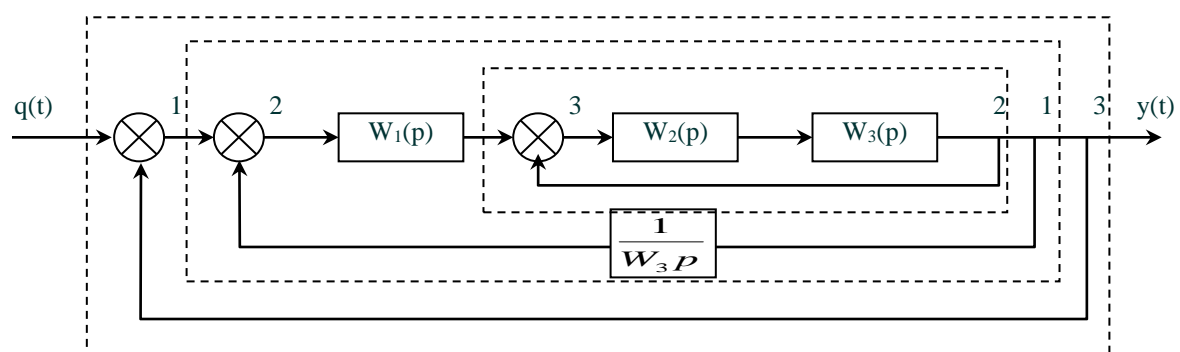


Рисунок 3.

Передаточна функція 1-го контуру:

$$W_{1к}(p) = \frac{W_2(p)W_3(p)}{1 + W_2(p)W_3(p)}.$$

Передаточна функція 2-го контуру:

$$W_{2к}(p) = \frac{W_{1к}(p)W_1(p)}{1 + W_{1к}(p)W_1(p)} \frac{1}{W_3(p)} = \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1 + W_2(p)W_3(p) + W_1(p)W_2(p)}$$

Для визначення передаточної функції розімкненої системи розімкнемо контур 3. Тоді

$$\begin{aligned}
W_{\text{раз}}(p) = W_{\text{лк}}(p) &= \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1+W_2(p)W_3(p)+W_1(p)W_2(p)} = \\
&= \frac{5}{(0,05)^2 p^2 + p + 1} \cdot \frac{10 + 15p}{1 + p} \cdot \frac{1,5p}{0,5p + 1} = \\
&= \frac{10 + 15p}{1 + p} \cdot \frac{1,5p}{0,5p + 1} + \frac{5}{(0,05)^2 p^2 + p + 1} \cdot \frac{10 + 15p}{1 + p} = \\
&= \frac{75 + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 110 p + 127} = \\
&= \frac{K + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 110 p + 127}. \tag{1}
\end{aligned}$$

Передаточна функція замкнутої системи може бути визначена з передаточної функції розімкнутої системи:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \tag{2}$$

Для визначення стійкості системи необхідно скласти характеристичне рівняння, яким є знаменник передаточної функції замкненої системи, прирівняний до нуля:

$$\begin{aligned}
W_{\text{зам}}(p) &= \frac{K + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + (K + 127)} = \\
&= \frac{75 + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + 202}; \tag{3}
\end{aligned}$$

$$0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + 202 = 0. \tag{4}$$

Ступінь характеристичного рівняння четвертий, тому доцільно використати критерій Гурвіца. З коефіцієнтів характеристичного рівняння складаємо визначник Гурвіца:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,56 & 222,5 & 0 & 0 \\ 0,00125 & 36,1 & 202 & 0 \\ 0 & 0,56 & 222,5 & 0 \\ 0 & 0,00125 & 36,1 & 202 \end{vmatrix} > 0$$

так як другий діагональний мінор

$$\Delta_2 = 0,56 \cdot 36,1 - 222,5 \cdot 0,00125 \approx 19,9 > 0$$

третьої діагональний мінор

$$\Delta_3 = 222,5 \cdot \Delta_2 - 0,56 \cdot (0,56 \cdot 202 - 0,00125 \cdot 0) \approx 4364 \text{ — додатне число.}$$

Тоді, згідно критерію стійкості Гурвіца, можна сказати, що дана система стійка.

Граничний коефіцієнт підсилення обчислюється з умови, коли система знаходиться на межі стійкості. За критерієм Гурвіца $K_{гр}$ обчислюється з умови

$$\Delta_3 = 0.$$

З коефіцієнтів характеристичного рівняння (проведена підстановка $K = K_{гр}$)

$$0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + (K_{gp} + 127) = 0. \quad (5)$$

складаємо третій діагональний мінор і прирівнюємо його до нуля:

$$\begin{vmatrix} 0,56 & 222,5 & 0 \\ 0,00125 & 36,1 & (K_{gp} + 127) \\ 0 & 0,56 & 222,5 \end{vmatrix} = 0$$

$$222,5 \cdot \Delta_2 - (K_{gp} + 127)(0,56 \cdot 0,56 - 222,5 \cdot 0) = 0.$$

Звідси граничний коефіцієнт підсилення системи

$$K_{gp} = \frac{4369}{0,3136} \approx 14019$$

При значенні коефіцієнта підсилення системи $K_{gp} = 14019$ в замкнутій системі виникають незатухаючі коливання, тобто система знаходиться на межі стійкості.

III. Для дослідження стійкості системи за критерієм Михайлова необхідно отримати рівняння годографа Михайлова. Останній можна отримати, якщо підставити в характеристичне рівняння (4) $p = j\omega$:

$$0,00125 (j\omega)^4 + 0,56 (j\omega)^3 + 36,1 (j\omega)^2 + 222,5 (j\omega) + 202 = 0. \quad (6)$$

Врахуйте, що $j = \sqrt{-1}$; $j^2 = -1$; $j^3 = -j$; $j^4 = 1$.

Випишемо окремо дійсну та уявну частини рівняння (6):

$$Re(\omega) = 0,00125 \omega^4 - 36,1 \omega^2 + 202;$$

$$Im(\omega) = -0,56 \omega^3 + 222,5 \omega.$$

Надаючи значення частоти в діапазоні $0 \leq \omega \leq \infty$, обчислюємо значення $Re(\omega)$ та $Im(\omega)$.

Результати обчислень зводяться в табл.3.

Таблиця 3

ω	0	1	2	3	5	10	100	500	∞
$Re(\omega)$	202	166	58	-123	-700	-3395	-236000	69100202	∞
$Im(\omega)$	0	222	441	655	153	1665	-537750	-6988875	$-\infty$

Якщо за даними табл.3 побудувати на комплексній площині годограф Михайлова, то за його виглядом можна зробити висновок про те, що система стійка, так як при зміні кутової частоти ω від 0 до ∞ годограф починається на дійсній додатній напіввісі та повертається в позитивному напрямку (проти годинникової стрілки) на число квадрантів, що дорівнює порядку характеристичного рівняння.

В даному випадку доцільно перевірити виконання умови критерію Михайлова для замкненої автоматичної системи аналітичним способом, тобто перевірити виконання умови

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4,$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – корені рівнянь

$$\begin{cases} 0,00125 \omega^4 - 36,1\omega^2 + 202 = 0; \\ -0,56\omega^3 + 222,5\omega = 0. \end{cases}$$

З першого рівняння отримуємо:

$$\omega_2 = 2,8 \text{ та } \omega_4 = 170.$$

З другого рівняння отримуємо:

$$\omega_1 = 0 \text{ та } \omega_3 = 19,93.$$

Так як $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$, тобто корені перемежуються, то система стійка. Цей висновок співпадає з висновком, що отриманий в п.2.

За допомогою критерію стійкості Михайлова визначаємо K_{gr} . Граничний коефіцієнт підсилення системи визначається з умови:

$$Re(\omega) = 0 \text{ та } Im(\omega) = 0,$$

так як система знаходиться на коливальній межі стійкості, коли крива Михайлова проходить через початок координат при частоті .

В рівнянні (5) проведемо заміну $p = j\omega$ та підставимо його у вигляді:

$$D(j\omega) = Re(\omega) + jIm(\omega);$$

$$\begin{cases} Re(\omega) = 0,00125 \omega^4 - 36,1\omega^2 + (K_{cp} + 127) = 0; \\ Im(\omega) = -0,56\omega^3 + 222,5\omega = 0. \end{cases}$$

З останнього рівняння знаходимо значення квадрата частоти, при якому крива Михайлова проходить через початок координат.

Після перетворень з рівняння $Re(\omega) = 0$ отримуємо:

$$K_{cp} = 14019.$$

Обчислене значення K_{cp} співпадає з значенням K_{cp} , що отримане в п.2 контрольного завдання.

IV. Передаточна функція похибки за каналом дії, що задається

$$W_{\Delta x}(p) = 1 - W_{зам}(p) = 1 - \frac{75 + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + 202}.$$

Дія, що задається, в операторній формі

$$X_{ex}(p) = \frac{1}{p}, \text{ так як } q(t) = 1(t).$$

Тоді, похибка складе

$$\Delta X_{esm} = \lim_{p \rightarrow 0} p W_{\Delta x}(p) X_{ex}(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{1}{p} \left[1 - \frac{75 + 112,5p}{0,00125 p^4 + 0,56 p^3 + 36,1 p^2 + 222,5 p + 202} \right] = 0,63.$$

Амплітудно-фазочастотну характеристику розімкнутої системи можна отримати, якщо підставити в рівняння (1) $p = j\omega$

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{75 + 112,5(j\omega)}{0,00125 (j\omega)^4 + 0,56 (j\omega)^3 + 36,1 (j\omega)^2 + 110,0 (j\omega) + 127}. \quad (7)$$

Модуль частотної передаточної функції розімкнутої системи або амплітудно-частотна характеристика

$$A(\omega) = |W_{роз}(j\omega)| = \sqrt{[Re(\omega)]^2 + [Im(\omega)]^2}, \quad (8)$$

де $Re(\omega)$ та $Im(\omega)$ - відповідно дійсна та уявна частина амплітудно-фазочастотної характеристики (7), поданій у вигляді:

$$W_{роз}(j\omega) = Re(\omega) + jIm(\omega).$$

Виділимо в знаменнику виразу (7) дійсну та уявну частини та помножимо чисельник і знаменник дробу на число, спряжене знаменнику.

Тоді

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{75(0,00125\omega^4 - 36,1\omega^2 + 127) + 112,5\omega(110\omega - 0,56\omega^3)}{(0,00125\omega^4 - 36,1\omega^2 + 127)^2 + (110\omega - 0,56\omega^3)^2} - j \frac{75(110\omega - 0,56\omega^3) - 112,5\omega(0,00125\omega^4 - 36,1\omega^2 + 127)}{(0,00125\omega^4 - 36,1\omega^2 + 127)^2 + (110\omega - 0,56\omega^3)^2}. \quad (9)$$

З рівняння (9) за формулою (8) отримаємо:

$$A(\omega) = |W_{роз}(j\omega)| = \sqrt{\frac{5625 + 12656,25\omega^2}{(0,00125\omega^4 - 36,1\omega^2 + 127)^2 + (110\omega - 0,56\omega^3)^2}}, \quad (10)$$

Амплітуда похибки при гармонійній дії, що подається на вхід системи, визначається за формулою

$$X_{\max} \approx \frac{A}{|W_{роз}(j\omega_k)|},$$

де $A = 10$ – амплітуда вхідного гармонійного сигналу; $\omega_k = 2$ – частота; $|W_{роз}(j\omega_k)| = A(\omega_k)$ – модуль частотної передаточної функції розімкнутої системи при $\omega = \omega_k = 2$.

$$X_{\max} = \frac{10}{\sqrt{\frac{5625 + 12656,25(2)^2}{[(0,00125(2)^4 - 36,1(2)^2 + 127]^2 + [110 \cdot 2 - 0,56(2)^3]^2}}} = \frac{10}{\sqrt{1,11}} \approx 9,5$$

Порядок захисту роботи.

Викладач складає графік ходу виконання розрахункової роботи, де зазначаються контрольні терміни виконання основних розділів, подання роботи до захисту. Якщо при виконанні роботи у студента виникають ускладнення з вирішенням завдань, він може звернутися до викладача за консультацією.

Студент, що не подав розрахункову роботу, чи не захистив її у встановлений термін, вважається таким, що має академічну заборгованість.

У процесі захисту студент обґрунтовує рішення, що приймаються, відповідає на поставлені запитання.

За результатами захисту розрахункової роботи студент отримує відповідну кількість балів згідно рейтинговій системі оцінювання, яка виставляється на титульному аркуші і завіряється підписом викладача.

Література

1. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування. Підручник/
М.Г.Попович, Ковальчук О.В. – К.: Либідь, 2007. – 656с.
2. Головки В.М. Теоретичні основи автоматики (курс лекцій). Ніжин:
“Аспект-Поліграф”.–2004.–108с.

Додатки
Таблиця 1

Варіант	Структурна схема систем автоматичного керування
0.	
1.	
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	

Варіант	Структурна схема систем автоматичного керування
7.	
8.	
9.	

Таблиця 2

Варіант	Умовні позначення ланок	Диференційне рівняння ланки	Числові значення величин К і Т
1	2	3	4
0.	А	$T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K T_2 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$	К=3; Т ₁ =1; Т ₂ =0,5
	Б	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=1; Т=1
	В	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=6; Т=0,3
	Г	$x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=3
	Д	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{bt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=5; Т=0,5
1.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=1; Т ₁ =0,2; Т ₂ ² =0,02
	Б	$T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot T_2 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$	К=3; Т ₁ =1; Т ₂ =2
	В	$T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot T_2 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + K \cdot x_{\text{вх}}$	К=2; Т ₁ =1; Т ₂ =0,5
	Г	$x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=6
	Д	$x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=0,5
2.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=0,5; Т ₁ =0,2; Т ₂ ² =0,1
	Б	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=10; Т=1
	В	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=1; Т=0,2
	Г	$x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=4
	Д	$T x_{\text{вх}} = K \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$	К=1; Т=0,3
3.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2} + x_{\text{вх}} = K x_{\text{вх}}$	К=4; Т ₂ ² =0,6
	Б	$x_{\text{вх}} = K x_{\text{вх}}$	К=2
	В	$T_2 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + K x_{\text{вх}}$	К=4; Т ₁ =0,5; Т ₂ =1,5
	Г	$x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=7
	Д	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=3; Т=0,4
4.	А	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=5; Т=0,5
	Б	$T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} = K \cdot x_{\text{вх}}$	К=1; Т=0,8

1	2	3	4
	В	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=2; T=1
	Г	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=9
	Д	$T_2 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = KT_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + Kx_{\text{внх}}$	K=0,5; T ₁ =0,2; T ₂ =0,5
5.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{внх}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=2; T ₂ ² =0,14; T ₁ =0,3
	Б	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=5; T=2
	В	$Tx_{\text{внх}} = K \frac{dx_{\text{внх}}}{dt}$	K=1; T=0,5
	Г	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=10
	Д	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=4; T=1
6.	А	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=1; T=0,2
	Б	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{внх}}}{dt^2} + x_{\text{внх}} = Kx_{\text{внх}}$	K=2; T ₂ ² =0,12
	В	$T_2 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = KT_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + Kx_{\text{внх}}$	K=3; T ₁ =0,5; T ₂ =1
	Г	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=0,5
	Д	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=0,5
7.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{внх}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=0,3; T ₁ =3; T ₂ ² =0,05
	Б	$Tx_{\text{внх}} = K \frac{dx_{\text{внх}}}{dt}$	K=0,5; T=1
	В	$T_2 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = KT_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + Kx_{\text{внх}}$	K=4; T ₁ =0,5; T ₂ =1
	Г	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=6
	Д	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=1
8.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{внх}}}{dt^2} + x_{\text{внх}} = Kx_{\text{внх}} + T_1 \frac{dx_{\text{внх}}}{dt}$	K=2; T ₁ =3; T ₂ ² =0,12
	Б	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} + x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=8; T=1
	В	$T \frac{dx_{\text{внх}}}{dt} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=5; T=0,2
	Г	$x_{\text{внх}} = K \cdot x_{\text{внх}}$	K=12
	Д	$Tx_{\text{внх}} = K \frac{dx_{\text{внх}}}{dt}$	K=2; T=0,3
9.	А	$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{внх}}}{dt^2} + x_{\text{внх}} = Kx_{\text{внх}}$	K=2; T ₂ ² =0,2;

1	2	3	4
	Б	$T \frac{dx_{aux}}{dt} + x_{aux} = K \cdot x_{ex}$	K=5; T=1,2
	В	$T_2 \frac{dx_{aux}}{dt} + x_{aux} = KT_1 \frac{dx_{ex}}{dt} + Kx_{ex}$	K=2,5; T ₁ =0,5; T ₂ =1
	Г	$x_{aux} = K \cdot x_{ex}$	K=1
	Д	$T_1 x_{aux} = K \frac{dx_{ex}}{dt}$	K=2,5; T ₁ =1