

**Д. Ю. ШАРЕЙКО, І. С. БІЛЮК, А. М. ФОМЕНКО, О. В. САВЧЕНКО**

## **ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

### **У двох частинах Частина 2 НЕЛІНІЙНІ СИСТЕМИ**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

*Рекомендовано Методичною радою НУК*

Електронне видання  
комбінованого використання на DVD-ROM



Миколаїв ♦ НУК ♦ 2017

УДК 681.5(076)  
Н 49

*Автори:*

Д. Ю. Шарейко, кандидат технічних наук, доцент;

І. С. Білюк, кандидат технічних наук, доцент;

А. М. Фоменко, доцент НУК;

О. В. Савченко, інженер-електрик, завідувач лабораторіями кафедри автоматики

У підготовці методичних вказівок участь брали студенти Ярохін О. В. (група 6371),  
Кирпичніков Д. М. (група 5372)

*Рецензент* Р. А. Ставинський, кандидат технічних наук, доцент

Н 49 Теорія автоматичного керування : методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт : у 2 ч. Ч. 2. Нелінійні системи / Д. Ю. Шарейко,  
І. С. Білюк, А. М. Фоменко, О. В. Савченко. – Миколаїв : НУК, 2017. – 155 с.

Вказівки охоплюють другу частину курсу "Теорія автоматичного керування", яка присвячена дослідженню нелінійних систем автоматичного керування. Усі лабораторні роботи виконуються із застосуванням обчислювальної техніки та пакета програм MBTU. Наведено опис основних засобів MBTU, теоретична частина та методика проведення числових експериментів.

Призначено для студентів електротехнічних та інших спеціальностей, які вивчають курс теорії автоматичного керування.

УДК 681.5(076)

Навчальне видання

**ШАРЕЙКО** Дмитро Юрійович

**БІЛЮК** Іван Сергійович

**ФОМЕНКО** Андрій Миколайович

**САВЧЕНКО** Олег Валерійович

## **ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

**У двох частинах**

**Частина 2**

**НЕЛІНІЙНІ СИСТЕМИ**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт

Комп'ютерне верстання *А. В. Платонова*

© Шарейко Д. Ю., Білюк І. С., Фоменко А. М., Савченко О. В., 2017

© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2017

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 9,1. Тираж 15 прим. Вид. № 26. Зам. № 70.

Видавець і виготовник Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

## **ВСТУП**

Лабораторні роботи, що наведені у методичних вказівках виконуються за допомогою персонального комп'ютера. Програмна оболонка маловідома, але дуже потужна саме для розв'язку задач у нелінійних системах автоматичного керування – MBTU. Ця оболонка розроблена в Московському державному вищому училищі ім. Баумана. Тому перед виконанням лабораторних робіт з нелінійних систем студенти мають опанувати основними навичками з застосування програмної оболонки MBTU. Ці навички з початку випробовуються на добре відомих лінійних системах і лише потім застосовується MBTU для дослідження нелінійних систем.

Перша частина методичних вказівок розглядає теоретичні засади та математичний апарат, який потім буде застосований у дослідженнях. Друга частина присвячена опису програмної оболонки «MBTU». Третя частина власне містить лабораторний практикум для дослідження електромеханічних систем автоматичного керування. Також додаються таблиці індивідуальних завдань для студентів.

Проте для виконання лабораторних робіт не обов'язково застосовувати MBTU, можна також використовувати добре відомий програмний пакет MatLab – компоненти SIMULINK.

## 1. МЕТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 1.1. ФОРМИ ПОДАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Математичне моделювання технічних систем, у тому числі САК і САР, базується на математичних моделях. Під терміном **математична модель** розуміється записана у формі математичних співвідношень сукупність знань, подань і гіпотез про технічну систему.

Первинною (вихідною) формою подання математичної моделі (математичним описом) будь-якій САР є система диференціальних і алгебраїчних рівнянь, що відображають динамічні властивості об'єкта регулювання і елементів системи (регулятора). Ці рівняння можуть бути визначені аналітично на основі законів фізики, покладених в основу роботи об'єкта регулювання і елементів системи, або експериментально з використанням методів активного або пасивного експерименту.

Аналітичний метод визначення математичних моделей автоматичних систем розглянемо на прикладі найпростішої САР температури в камері для інкубації яєць (рисунок 1.1).

Об'єктом регулювання в даній САР є інкубаційна камера з лотком і яйцями, покладеними на нього. Регульована величина – температура в камері  $\theta_k$  залежить від збурюючого впливу – температури навколишнього  $\theta_0$  середовища. Величину  $\theta_k$  можна регулювати, змінюючи регулюючий вплив – температуру нагрівального елемента  $\theta_n$ .

Дана САР працює в такий спосіб. Для виміру температури в інкубаційній камері  $I$  є термопара 2, сигнал якої – ЕДС  $E$  рівняється із задаючим (опорним) сигналом  $U_0$ . Змінюючи опорну напругу  $U_0$  за допомогою резистора 9, підключеного до стабілізованого джерела постійного струму, задають необхідну температуру в камері інкубатора ( $\theta_{\text{зад}} = 37,5 \pm 0,2$  °C). При цьому вхідні і вихідні величини елементів САР ( $\Delta U = U_0 - E$ ;  $U_y$ ;  $\theta_n$ ) будуть мати певні значення, що відповідають заданому значенню температури в інкубаторі.

Якщо, наприклад, зовнішнє збурювання – температура навколишнього середовища  $\theta_0$  зменшилася, то знизиться і температура  $\theta_k$  усередині камери інкубатора. Це, у свою чергу, приведе до зменшення сигналу термопари  $E$  і до збільшення сигналу неузгодженості  $\Delta U = U_0 - E$ , що викличе збільшення напруги  $U_n$  на нагрівальному елементі, виділеної їм потужності  $P$  і його температури  $\theta_n$ .

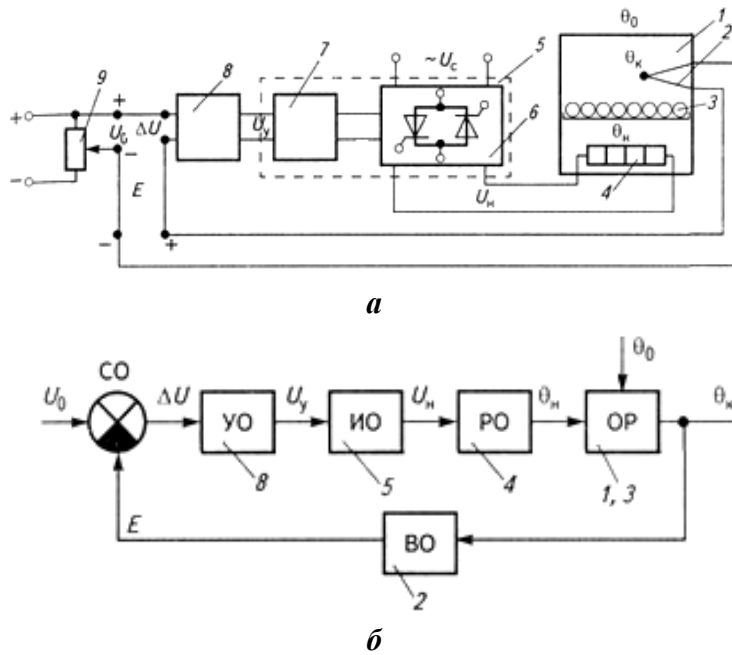


Рисунок 1.1. Принципова (а) і функціональна (б) схеми САР температури в камері інкубатора:

- 1 – інкубаційна камера; 2 – термopаpa; 3 – лоток з яйцями; 4 – нагрівальний елемент;  
 5 – виконавчий орган – тиристорний регулятор напруги; 6 – силовий блок;  
 7 – блок керування тиристорами; 8 – електронний підсилювач постійного струму;  
 9 – задаючий резистор; ОР – об'єкт регулювання; РО – регулювальний орган; ВО – виконавчий орган;  
 ПО – підсилювальний орган; 3 – порівнюючий орган; В – сприймаючий орган

Збільшення останньої приведе до росту температури  $\theta_k$  до заданого значення. Збільшення температури навколишнього середовища  $\theta_0$  за аналогією з вищевикладеним викличе зворотний ефект (збільшення  $\theta_k$ ,  $E$  и зменшення  $U_v$ ,  $U_n$ ,  $\theta_k$ ).

Розглянута найпростіша САР може функціонувати тільки при виконанні умови  $\theta_0 < \theta_{\text{зад}}$ . Якщо можливі умови, коли  $\theta_0 > \theta_{\text{зад}}$  (у теплий період року), САР необхідно доповнити ще одним регулювальним органом, що забезпечує охолодження інкубаційної камери.

Завдання побудови математичної моделі даної САР складається у визначенні рівнянь, що відображають взаємозв'язки в об'єкті регулювання регульованої величини  $\theta_k$  із вхідними впливами  $\theta_n$  і  $\theta_0$  а в інших елементах системи відповідно вихідних величин із вхідними в динамічному режимі.

У динамічному режимі роботи будь-якої САР регульована величина, а також вхідні і вихідні величини змінюються в часі  $t$ . Тому всі розглянуті раніше величини стосовно до САР (див. рисунок. 1.1) будуть змінними в часі і їх варто записувати так:  $\theta_k(t)$ ,  $\theta_0(t)$ ,  $\theta_n(t)$ ,  $E(t)$ ,  $\Delta U(t)$ ,  $U_v(t)$ ,  $U_n(t)$ . Однак для спрощення запису допускається зображення змінних величин без вказівки часу  $t$ , що й буде використано при подальшому викладі.

**Математичну модель об'єкта регулювання** (камери інкубатора разом з лотком і яйцями) визначають на основі рівняння теплового балансу:

$$C_k m_k \frac{d\theta_k}{dt} = \Phi_{п.к} - \Phi_{0.к}, \quad (1.1)$$

де  $C_k$  – усереднена теплоємність, обумовлена теплоємністями повітря усередині камери, яєць і матеріалу лотка;  $m_k$  – усереднена маса, обумовлена масами повітря, яєць і лотка;

$\Phi_{п.к}$  – потік теплоти, що надходить у камеру від нагрівального елемента;  $\Phi_{0.к}$  – потік теплоти, що відводить із камери через стінки в навколишнє середовище.

Потік теплоти, що надходить у камеру від нагрівача,

$$\Phi_{п.к} = a_{\text{н}} F_{\text{н}} (\theta_{\text{н}} - \theta_{\text{к}}) \quad (1.2)$$

де  $\alpha_{\text{н}}$  – коефіцієнт тепловіддачі нагрівального елемента;  $F_{\text{н}}$  – площа поверхні нагрівального елемента.

Потік теплоти, що відводить із камери,

$$\Phi_{0.к} = a_0 F_0 (\theta_{\text{к}} - \theta_0) \quad (1.3)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт тепловіддачі огороження (стінок) камери;  $F_0$  – площа тепловіддачі поверхні стінок камери.

З урахуванням формул (1.2) і (1.3) рівняння (1.1) після нескладних перетворень прийме вид:

$$\frac{C_{\text{к}} m_{\text{к}}}{a_{\text{н}} F_{\text{н}} + a_0 F_0} \frac{d\theta_{\text{к}}}{dt} + \theta_{\text{н}} = \frac{a_{\text{н}} F_{\text{н}}}{a_{\text{н}} F_{\text{н}} + a_0 F_0} \theta_{\text{н}} + \frac{a_0 F_0}{a_{\text{н}} F_{\text{н}} + a_0 F_0} \theta_0,$$

або

$$T_{\text{к}} \frac{d\theta_{\text{к}}}{dt} + \theta_{\text{н}} = k_{\text{н}} \theta_{\text{н}} + k_0 \theta_0, \quad (1.4)$$

Постійну часу  $T_{\text{к}}$  камери і коефіцієнти передачі  $k_{\text{н}}$  і  $k_0$  визначають по формулах:

$$T_{\text{к}} = \frac{C_{\text{к}} m_{\text{к}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_0 F_0}; \quad k_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_0 F_0}; \quad k_0 = \frac{\alpha_0 F_0}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_0 F_0}.$$

**Математичну модель регулювального органа** (нагрівального елемента) визначають за аналогією з викладеним раніше на основі рівняння теплового балансу

$$C_{\text{н}} m_{\text{н}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{dt} = P_{\text{н}} - \Phi_{п.к}, \quad (1.5)$$

де  $C_{\text{н}}$ ,  $m_{\text{н}}$  – відповідно питома теплоємність і маса нагрівального елемента;  $P_{\text{н}}$  – потужність нагрівального елемента.

З урахуванням формули (1.2) рівняння (1.5) після відповідних перетворень прийме вид

$$\frac{C_{\text{н}} m_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{dt} + \theta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}} + \theta_{\text{к}}. \quad (1.6)$$

Уводячи позначення

$$T_{\text{н}} = \frac{C_{\text{н}} m_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}} \text{ і } k_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}},$$

рівняння (1.5) можна остаточно записати так:

$$T_{\text{н}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{dt} + \theta_{\text{н}} = k_{\text{н}} P_{\text{н}} + \theta_{\text{к}}, \quad (1.7)$$

де  $T_{\text{н}}$ ,  $k_{\text{н}}$  – відповідно постійна часу і коефіцієнт передачі нагрівального елемента.

Потужність

$$P_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2 / R, \quad (1.8)$$

де  $U_{\text{н}}^2$  – напруга на нагрівальному елементі;  $R$  – активний опір нагрівального елемента.

Таким чином, динаміка нагрівального елемента описується рівняннями (1.7) і (1.8).

Для одержання **математичної моделі** (диференціального рівняння) **сприймаючого органа** (термопар) запишемо рівняння теплового балансу

$$C_m m_m \frac{d\theta_m}{dt} = \Phi_{\text{п.м}}, \quad (1.9)$$

де  $C_m$ ,  $m_m$  – відповідно питома теплоємність і маса термопар;  $\theta_m$  – температура термопар;  $\Phi_{\text{п.м}}$  – потік теплоти, що надходить до термопар з повітряного простору камери.

Потік теплоти

$$\Phi_{\text{п.м}} = a_m F_m (\theta_{\text{к}} - \theta_m), \quad (1.10)$$

де  $a_m$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до термопар;  $F_m$  – площа поверхні термопар.

З урахуванням формули (1.10) рівняння (1.9) прийме вид

$$C_m m_m \frac{d\theta_m}{dt} + a_m F_m \theta_m = a_m F_m \theta_{\text{к}}, \quad (1.11)$$

Уводимо позначення

$$T_m = \frac{C_m m_m}{a_m F_m},$$

де  $T_m$  – постійна часу термопар.

Тоді рівняння теплового балансу остаточно запишемо так:

$$T_m \frac{d\theta_m}{dt} + \theta_m = \theta_{\text{к}} \quad (1.12)$$

Це рівняння відображає тільки термічний процес у термопарі. За умовою завдання необхідно визначити взаємозв'язок температури в камері  $\theta_{d0}$  з ЕДС термопар  $E$ . Залежність ЕДС термопар від її температури  $\theta_m$  можна приблизно описати так:

$$E = k_m \theta_m, \quad (1.13)$$

де  $k_m$  – коефіцієнт, обумовлений за графіком градуючої (статичний) характеристики термопар (рисунок 1.2) як відношення збільшень  $\Delta E$  до  $\Delta \theta$  у робочій зоні:  $k_m = \Delta E / \Delta \theta$ .

Виключаючи в рівняннях (1.12) і (1.13) проміжну змінну  $\theta_m$  і з огляду на, що

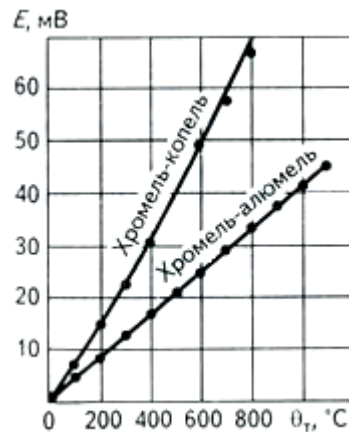


Рисунок 1.2. Граничні характеристики термопар

Інші елементи розглянутої САР (див. рисунок 1.1) – тиристорний регулятор напруги (ВО) і електронний підсилювач (ПУ) є електротехнічними пристроями. Їхні математичні моделі можна визначити на основі законів електротехніки. Ці елементи відносяться до електронних пристроїв, у яких вхідні сигнали передаються на вихід практично без яких-небудь тимчасових затримок, тому що струм у них створюється за рахунок електронів і «дірок», що володіють надмалою масою. Тому математичні моделі тиристорного регулятора напруги (підсилювача) і електронного підсилювача описуються відповідно наступними алгебраїчними рівняннями

$$U_n = k_{\text{тр}} U_y; U_y = k_e \Delta U, \quad (1.15)$$

де  $k_{\text{тр}}$ ,  $k_e$  – коефіцієнти підсилення відповідно тиристорного регулятора і електронного підсилювача.

Висновок рівнянь (1.15), виконаний на основі законів Кірхгофа, можна знайти в будь-якому підручнику по електротехніці.

Таким чином, з урахуванням залежності  $\Delta U = U_0 - E$  відображаючи зворотній зв'язок у системі, на основі рівнянь (1.4), (1.7), (1.8), (1.14) і (1.15) **математична модель САР температури** в інкубаторі може бути представлена наступною системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} T_{\kappa} \frac{d\theta_{\kappa}}{dt} + \theta_{\kappa} &= k_{\kappa} \theta_n + k_0 \theta_0; \\ T_m \frac{dE}{dt} + E &= k_m \theta_{\kappa}; \\ \Delta U &= U_0 - E; \\ U_y &= k_e \Delta U; \\ U_n &= k_{\text{тр}} U_y; \\ P_n &= U_n^2 / R; \\ T_n \frac{d\theta_n}{dt} + \theta_n &= k_n P_n + \theta_{\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Аналіз системи рівнянь (1.16) показує, що розглянута САР нелінійна. Її нелінійність обумовлена наявністю нелінійних алгебраїчних рівнянь (1.8). Це рівняння можна привести до лінеаризованого виду, використовуючи відомі в теорії автоматичного регулювання методи лінеаризації [2], ґрунтуючись на наступних міркуваннях.

Розглянута система стабілізації температури в інкубаторі (див. рисунок 1.1) призначена для підтримки температури в камері  $\theta_k$  на заданому рівні. При роботі системи величина  $\theta_k$  змінюється в межах малих відхилень  $\pm \Delta \theta_k$  відносно заданого значення. У межах малих відхилень також будуть змінюватися всі вхідні і вихідні величини елементів САР, у тому числі напруга  $U_n$  на нагрівальному елементі і його потужність  $P$  відповідно щодо значень  $U_{n0}$  і  $P_0$  (тут  $U_{n0}$ ,  $P_0$  – напруга на нагрівальному елементі і його потужність, що відповідають сталому заданому значенню температури в інкубаторі).

Для лінеаризації рівняння (1.8) скористаємося аналітичним методом лінеаризації, розклавши його в ряд Тейлора, при  $U = U_{n0}$ :

$$P = P_0 + \left( \frac{dP}{dU} \right) \frac{(U_n + U_{n0})}{1!} + \left( \frac{d^2 P}{dU^2} \right) \frac{(U_n + U_{n0})^2}{2!} + \left( \frac{d^3 P}{dU^3} \right) \frac{(U_n + U_{n0})^3}{3!} + \dots$$

Зневажаючи нелінійними членами ряду через їхню малість, одержуємо

$$P - P_0 = \left( \frac{dP}{dU} \right) (U_n + U_{n0}).$$

Тому що  $P - P_0 = \Delta P$ , а  $U_n - U_{n0} = \Delta U_n$  – це лінеаризоване рівняння в межах малих відхилень потужності  $\Delta P$  і напруги  $\Delta U_n$  можна записати в наступному виді

$$\Delta P = k_p \Delta U_n. \quad (1.17)$$

Для визначення  $k_p$  візьмемо похідну від вихідної функції (1.18)

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U_n^2/R)}{dU} = \frac{2U_n}{R}.$$

Підставивши в це рівняння  $U_n = U_{n0}$  одержимо

$$k_p = \left( \frac{dP}{dU} \right)_{U_n=U_{n0}} = \frac{2U_{n0}}{R}. \quad (1.18)$$

З урахуванням рівняння (1.18) лінеаризоване рівняння потужності нагрівального елемента (1.17) прийме вид

$$\Delta P = \frac{2U_{n0}}{R} \Delta U_n. \quad (1.19)$$

Таким чином, нелінійну математичну модель САР (1.16) з урахуванням рівняння (1.17) можна розглядати як лінеаризовану математичну модель.

Відомо [2...4], що лінійні й лінеаризовані математичні моделі САР у вигляді диференціальних і алгебраїчних рівнянь можуть бути представлені відповідно передаточним функціям. Для розглянутої САР передаточні функції на основі рівнянь (1.4),

(1.7), (1.14), (1.15), (1.17) після їхнього перетворення по Лапласу при нульових початкових умовах приймуть вид:

$$\left. \begin{aligned}
 W_{к.р}(p) &= \frac{\theta_к(p)}{\theta_н(p)} = \frac{k_к}{T_к p + 1} \text{ – передаточна функція камери інкубатора по} \\
 &\text{регулюючому впливі;} \\
 W_{к.в}(p) &= \frac{\theta_к(p)}{\theta_0(p)} = \frac{k_0}{T_к p + 1} \text{ – передаточна функція камери по обурюючому} \\
 &\text{впливі;} \\
 W_т(p) &= \frac{E(p)}{\theta_к(p)} = \frac{k_т}{T_т p + 1} \text{ – передаточна функція термопари;} \\
 W_{н1}(p) &= \frac{\theta_н(p)}{P(p)} = \frac{k_н}{T_н p + 1} \text{ – передаточна функція нагрівача по каналі} \\
 &\text{потужності } P; \\
 W_{н2}(p) &= \frac{\theta_н(p)}{\theta_к(p)} = \frac{1}{T_н p + 1} \text{ – передаточна функція нагрівача по каналі} \\
 &\text{температури } \theta_к; \\
 W_p(p) &= \frac{\Delta P(p)}{\Delta U_н(p)} = k_p \text{ – передаточна функція, що відповідає лінеаризованому} \\
 &\text{рівнянню (1.17);} \\
 W_y(p) &= \frac{U_y(p)}{\Delta U(p)} = k_y \text{ – передаточна функція електронного підсилювача;} \\
 W_{тр}(p) &= \frac{U_н(p)}{U_y(p)} = k_{тр} \text{ – передаточна функція тиристорного регулятора} \\
 &\text{напруги,}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

де  $\theta_к(p)$ ,  $\theta_н(p)$ ,  $\theta_0(p)$ ,  $E(p)$ ,  $P(p)$ ,  $\Delta P(p)$ ,  $U_н(p)$ ,  $\Delta U_н(p)$ ,  $U_y(p)$ ,  $\Delta U(p)$  – зображення по Лапласу відповідно температури в камері  $\theta_к$ , нагрівача  $\theta_н$ , що оточує атмосферу  $\theta_0$ , ЕДС  $E$  термопари, потужність  $P$  і її відхилення  $\Delta P$ , напруга  $U_н$  і його відхилення  $\Delta U_н$ , напруга  $U_y$  і сигнал неузгодженості  $\Delta U_н$  при нульових початкових умовах.

Інтерпретація математичних моделей автоматичних систем сукупністю передаточних функцій об'єкта регулювання і елементів регулятора дозволяє представити математичні моделі САР графічно у вигляді структурних схем [2...4], які досить просто скласти на основі заданих функціональних схем і передаточних функцій. Стосовно до розглянутого приклада структурна схема САР (див. рисунок. 1.1) відповідно до її функціональної схеми і наведеними вище передаточними функціями буде мати вигляд, показаний на рисунку 1.3. На структурних схемах замість зображень змінних (вхідних і вихідних величин) допускається вказувати їхні оригінали, що істотно підвищує їхню дидактичність і фізичну наочність.



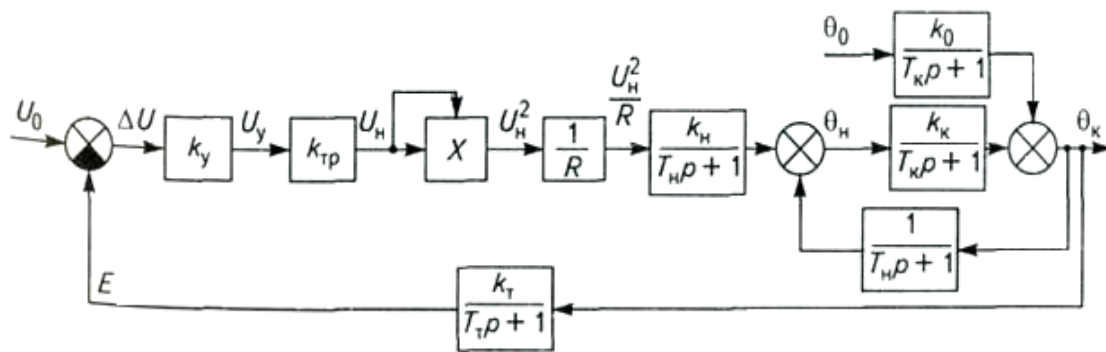


Рисунок 1.5. Структурна схема нелінійної САР температури в інкубаторі

Узагальнюючи викладене, можна відзначити наступне: *вихідні математичні моделі САР – це системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь, а похідні від них – передаточні функції і структурні схеми*. Крім розглянутих раніше форм подання математичних моделей у теорії автоматичних систем використовують математичні моделі у формі Коші і векторно-матричній формі, вивчення яких не передбачено типовою програмою дисципліни «Автоматика» для агроінженерних спеціальностей.

У даному навчальному посібнику використані математичні моделі у вигляді структурних схем, тому що в основу ПК «МВТП», що є його програмною базою, закладений метод структурного моделювання. Варто підкреслити, що за допомогою ПК «МВТП» можна моделювати також автоматичні системи, представлені у формі Коші і векторно-матричній формі.

## 1.2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 1.2.1. Мета моделювання систем автоматичного регулювання

У загальному випадку під терміном математичне моделювання автоматичних систем розуміються процеси відшукування їхніх математичних моделей (п. 1.1), а також безпосереднього дослідження і аналізу цих моделей на основі методів теорії автоматичного керування і регулювання аналітично, графоаналітично або з використанням ЕОМ [2...4].

У міру розвитку обчислювальної техніки розроблено досить багато прикладних програм стосовно до сучасних комп'ютерів (про їх згадувалося в «Введенні»), що забезпечують дослідження перехідних і сталих процесів в автоматичних системах будь-якої складності і практично в будь-яких режимах роботи при зміні їхніх параметрів і структури. Метод дослідження САР на основі таких прикладних програм є методом математичного моделювання за допомогою комп'ютера – **методом комп'ютерного моделювання**. Його сутність полягає в тому, що на основі математичної моделі САР за допомогою прикладної програми на комп'ютері одержують графіки перехідних процесів. Аналізуючи ці графіки, досягають наступних **цілей**:

- визначають стійкість системи;
- визначають якість системи;
- якщо система виявляється нестійкою або показники якості не відповідають заданим вимогам, то, змінюючи параметри елементів САР або її структуру (уводять додаткові

коригувальні елементи), домагаються бажаного результату (стійкості системи або необхідних показників якості), оптимізуя закон регулювання або параметри регулятора.

### 1.2.2. Аналіз стійкості і якості систем автоматичного регулювання

**Стійкість САР** оцінюють по виду перехідного процесу. Якщо графік перехідного процесу збіжний, то система стійка, а якщо розбіжний, то нестійка. Пояснимо сказане на прикладі САР температури в інкубаторі (див. рисунок 1.1 і 1.5). Припустимо, що в результаті комп'ютерного моделювання режиму включення в роботу САР на основі структурної схеми (див. рисунок 1.5) отримано два графіки: один збіжний (рисунок 1.6, а), інший розбіжний (рисунок 1.6, б).

У першому випадку  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\theta_k \rightarrow \Delta\theta_{k,ст}$  при  $t \rightarrow \infty$ , а в другому випадку  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\theta_k \rightarrow \infty$  при  $t \rightarrow \infty$ . Отже, у першому випадку САР буде стійкою, а в другому – нестійкою.

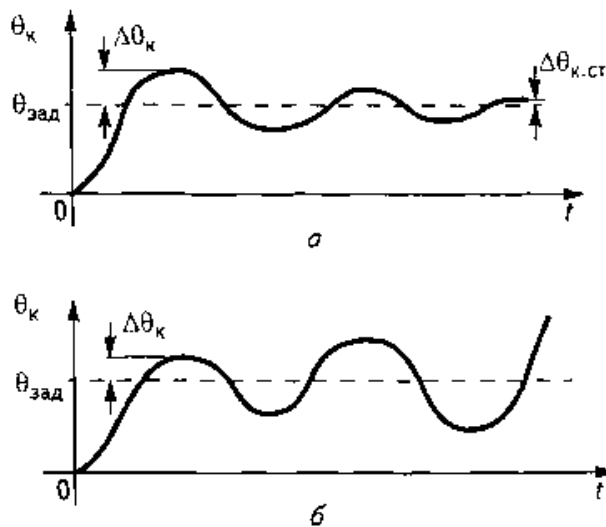


Рисунок 1.6. Перехідні процеси САР:

а – збіжний; б – розбіжний;  $\Delta\theta_k$  – відхилення температури в камері  $\theta_k$  від заданого значення  $\theta_{зад}$ ;  $\Delta\theta_{k,ст}$  – статична помилка.

Відомо [2...4], що **якість САР** варто оцінювати окремо по задаючому й обурюючому впливу. При цьому показники якості повинні відповідати заданим вимогам. Оцінку якості САР за допомогою комп'ютерного моделювання доцільно проводити по графіках перехідних процесів при східчастих вхідних впливах (перехідним функціям). При цьому спочатку можна одержати перехідну функцію по задаючому впливу, прийнявши обурюючий вплив рівним нулю, а потім – перехідну функцію по обурюючому, прийнявши задаючий вплив рівним нулю. Значення задаючого впливу розраховують із урахуванням коефіцієнта статизма  $k_{ст}$ , а значення східчастого впливу – з обліком можливих максимальних значень зовнішніх збурювань.

Розглянемо методику і послідовність оцінки якості САР по перехідних функціях на прикладі системи стабілізації температури в інкубаторі (див. рисунок 1.1 й 1.3).

Значення задаючого впливу:

$$U_0 = \theta_{зад} / k_{ст}. \quad (1.21)$$

Коефіцієнт статизма САР задаючого впливу, визначається за структурною схемою (див. рисунок 1.3):

$$k_{ст} = W_{U_0}(0),$$

де  $W_U(0)$  – значення передаточної функції системи задаючого впливу, *при*  $p = 0$ .

Обурюючий вплив – температура атмосфери, що оточує інкубатор, буде визначатися її мінімальними можливими значеннями, що залежать від пори року.

Припустимо, що в процесі комп'ютерного моделювання розглянутої САР отриманий графік перехідної функції задаючого впливу, *при*  $\theta_0 = 0$  (рисунок 1.7).

Перехідний процес САР будуть характеризувати наступні показники якості:

- статичне відхилення (статична помилка) – відхилення регульованої величини від заданого значення після закінчення перехідного процесу:  $\theta_{ст} = \theta_{зад} - \theta_{уст}$ ;
- час регулювання  $t_p$ , протягом якого відхилення регульованої величини стане менше заздалегідь заданого значення, обумовленого необхідною точністю системи  $D$ ;
- перерегулювання, обумовлена різницею максимального значення регульованої величини і її значення в сталому режимі, %:

$$\sigma = \frac{\theta_{max} - \theta_{уст}}{\theta_{уст}} \cdot 100\%;$$

- число перерегулювань  $n$ , тобто число максимальних значень за час регулювань; для функції, зображеної на рисунку 1.7,  $n = 2$ ;
- логарифмічний декримент загасання, що характеризує швидкість загасання перехідного процесу:

$$d = \ln \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2},$$

де  $\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{уст}$ ;  $\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{уст}$ .

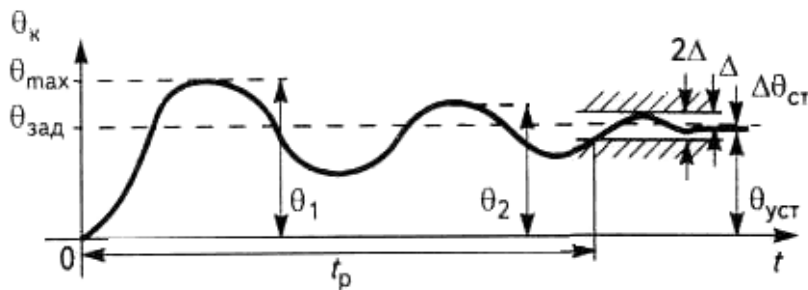


Рисунок 1.7. Перехідна функція САР по задаючому впливі

Слід зазначити, що статичну помилку задаючого впливу, можна повністю компенсувати за рахунок відповідного вибору задаючого впливу, з урахуванням формули (1.21). Це значить, що при достатній точності обчислень по формулі (1.21)

$$\theta_{зад} = \theta_{уст}, \text{ а } \theta_{ст} = 0.$$

У цьому випадку графік перехідної функції САР по збурюванню *при*  $U_0 = 0$  у відхиленнях регульованої величини від заданого значення буде мати вигляд, показаний на рисунку 1.8: *при*  $t = 0$  регульована величина має задане значення  $\theta_{зад}$ .

Відповідно до цього графіка показники якості САР по збурюванню наступні:

- статична помилка  $\Delta\theta_{ст}$ ;
- час регулювання  $t_p$ ;
- перерегулювання (верхні математичні знаки для позитивних значень  $\Delta\theta_{ст}$ , нижні – для негативних значень)

$$\sigma = \frac{\Delta\theta_{\max} \pm \Delta\theta_{\text{уст}}}{\theta_{\text{зад}} \pm \Delta\theta_{\text{ст}}} \cdot 100\%;$$

- число перерегулювань  $n = 2$ ;
- логарифмічний декримент загасання

$$d = \ln \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2}.$$

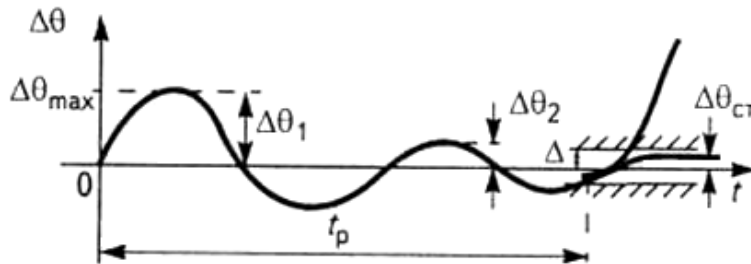


Рисунок 1.8. Перехідна функція САР обурюючого впливу

Розглянуті показники якості застосовні для коливальних перехідних процесів. При монотонних перехідних функціях (рисунок 1.9) якість САР характеризується статичною помилкою  $\Delta\theta_{\text{ст}}$  і часом регулювання  $t_p$ .

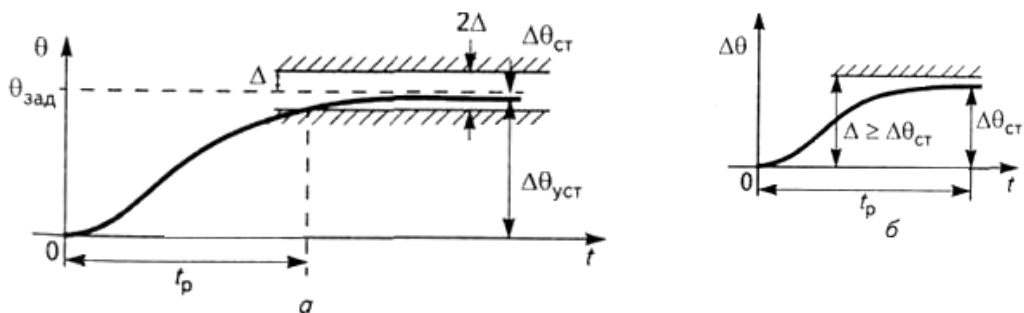


Рисунок 1.9. Монотонні перехідні функції (процеси) САР:

*а* – по задаючому впливі, *при*  $\theta_0 = 0$ ; *б* – по обурюючому, *при*  $U_0 = 0$ .

Перехідні функції по задаючому і обурюючому впливам при комп'ютерному моделюванні можна одержати у вигляді одного сполученого графіка (рисунок 1.10). При цьому спочатку прикладають східчастий задаючий вплив, а збурювання подають у вигляді зміщеної східчастої функції (рисунок 1.11).

$$\theta_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau; \\ \theta_{0c} & \text{при } t \geq \tau, \end{cases}$$

де  $\tau$  – час, що задовольняє умові  $\tau > t_{\text{п.з.}}$  (де  $t_{\text{п.з.}}$  – час загасання перехідного процесу по задаючому впливі)  $\theta_{0c}$ ; – значення східчастого впливу.

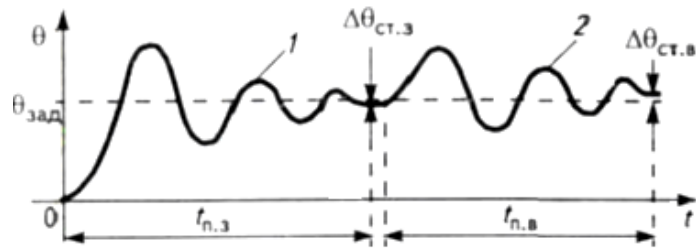


Рисунок 1.10. Сполучений графік перехідних процесів САР:

1 – по задаючому впливі; 2 – по обурюючому ;  $t_{п.з}$  – час переходного процесу від задаючого впливу;  
 $t_{п.в}$  – час переходного процесу обурення

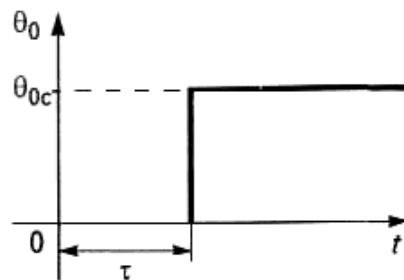


Рисунок 1.11. Зміщене східчає збурювання

До розглянутих показників якості пред'являють наступні конкретні вимоги з урахуванням регламентованої точності регульованої величини.

Статична помилка визначається необхідною точністю до підтримки регульованої величини. Так, для САР температури в інкубаторі погрішність стабілізації температури повинна бути не більше  $\pm 0,2$  °С. Отже, статична помилка  $\Delta\theta_{ст} \leq |0,2|$  °С. Стосовно до системи стабілізації температури у тваринницькому приміщенні (для змісту великої рогатої худоби) погрішність підтримки температури допускається на порядок більше в порівнянні з вимогами до температури в інкубаційній камері. Отже, і припустима статична помилка для такої системи може бути на порядок більше, тобто  $\Delta\theta_{ст} \leq |1,5 \dots 2|$  °С.

Значення заданої величини  $\Delta$ , що визначає тривалість часу регулювання  $t_r$ , звичайно приймають орієнтовно не більше 5% заданого значення регульованої величини. Величину  $\pm \Delta$  в автоматичі умовно називають «трубкою».

Перерегулювання  $\sigma$  не повинне перевищувати 20%, а число перерегулювань  $n \leq 2 \dots 3$ .

Що стосується логарифмічного декримента загасання, то до нього немає певних вимог. Його можна використовувати для порівняльної оцінки швидкодії різних варіантів САР (чим більше декримент загасання, тим вище швидкодія систем) і як непрямий показник при синтезі систем з максимальною швидкодією.

### 1.2.3. Корекція Системи Автоматичного Регулювання

Якщо в результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що САР виявилася нестійкою або її показники якості не відповідають заданим, то подальший процес моделювання зводиться до вибору коригувальних елементів відповідно до рекомендацій, викладеними далі.

Під корекцією САР розуміють зміну її структурних схем з метою забезпечення стійких з необхідними показниками якості перехідних процесів. Корекція САР досягається за допомогою введення в систему додаткових, так званих коригувальних елементів (пристроїв), що охоплюють один або кілька елементів вихідної системи. Якщо напрямок сигналів (впливів) у коригувальному пристрої збігається з напрямком сигналів в охоплюваних елементах, то зв'язок називають **прямий**. У протилежному випадку зв'язок буде **зворотнім**. Корекцію САР на основі прямих зв'язків прийнято називати послідовним, а з використанням зворотних зв'язків - паралельним.

Розглянемо випадки **послідовної корекції Системи Автоматичного Регулювання**.

Нехай задана структурна схема САР (рисунок 1.12), у яку введений додатковий коригувальний елемент із передаточною функцією  $W_k(p)$ , що забезпечує прямий позитивний зв'язок.

Найчастіше при створенні САР на першому етапі проектування в алгоритм її функціонування закладають найпростіший закон регулювання, відповідно до якого зв'язок між сигналом неузгодженості  $\Delta X$  і сигналом  $X_1$  наступна:

$$X_1 = k_1 \Delta X, \quad (1.22)$$

де  $k_1$  – передаточний коефіцієнт.

Такий закон регулювання називають пропорційним (*П-закон регулювання*). Йому відповідає передаточна функція

$$W_1(p) = k_1.$$

Як коригувальний елемент (див. рисунок 1.12) може бути прийнята ідеальна диференційна ланка з передаточною функцією

$$W_k(p) = T_o p,$$

де  $T_o$  – постійна часу.

Тоді в закон регулювання вводять похідну від сигналу неузгодженості

$$X_2 = T_o \frac{d \Delta X}{dt}. \quad (1.23)$$

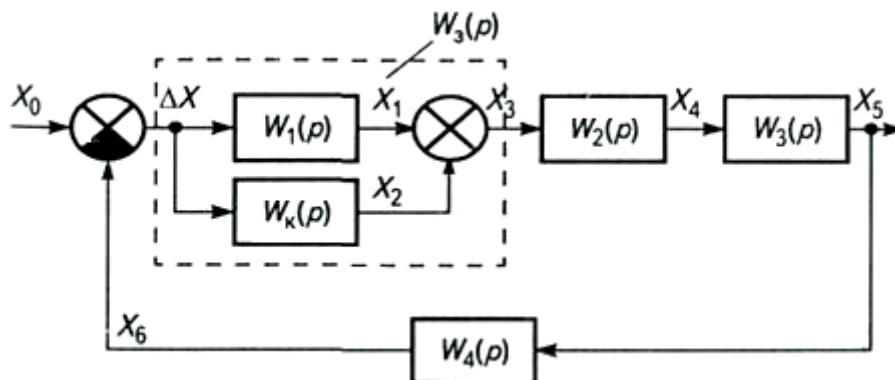


Рисунок 1.12. Структурна схема САР з послідовною корекцією

З урахуванням виражень (1.22) і (1.23) закон регулювання прийме вид

$$X_3 = k_1 \Delta X + T_o \frac{d\Delta X}{dt}. \quad (1.24)$$

Відповідна йому еквівалентна передаточна функція

$$W_o(p) = W_e(p) = (T_o p + k_1) = k_1 \left( \frac{T_o}{k_1} p + 1 \right). \quad (1.25)$$

Закон регулювання (1.24) із введенням похідної називається пропорційно-диференціальним (*ПД-законом регулювання*). Регулятор, що реалізує ПД-закон регулювання, реагує не тільки на значення відхилень регульованої величини в цей момент часу, але й на швидкість зміни відхилень. Отже, регулятор працює з випередженням, поліпшуючи якість перехідного процесу за рахунок обліку тенденції наступного його розвитку, тобто збільшує швидкодію системи і запас стійкості.

Ефективність введення в закон регулювання першої похідної від сигналу неузгодженості проілюструємо на наступному прикладі.

Нехай передаточні функції вихідної САР (див. рисунок 1.12) мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= k_1; & W_2(p) &= \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \\ W_3(p) &= \frac{k_3}{T_3 p + 1}; & W_4(p) &= k_4, \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

а відповідна їм передаточна функція розімкнутої системи

$$W_p(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (1.27)$$

Підвищити швидкодію розглянутої САР можна за рахунок зменшення впливу, наприклад, постійна часу  $T_2$ , підібравши постійну часу диференційної ланки з урахуванням *рівності*  $T_o/k_1 = T_2$ . Тоді передаточна функція скоректованої розімкнутої САР

$$\begin{aligned} W_{p.c}(p) &= [W_1(p) + W_k(p)] W_2(p) W_3(p) W_4(p) = \frac{(k_1 + T_o p) k_2 k_3 k_4}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = \\ &= \frac{(T_o p / k_1 + 1) k_1 k_2 k_3 k_4}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{T_3 p + 1}. \end{aligned}$$

Із цього вираження видно, що введення в закон регулювання похідної забезпечує повну компенсацію впливу постійної часу  $T_2$  і отже, поліпшує динамічні властивості системи.

Як коригувальний елемент (див. рисунок 1.12) можна використати ідеальну інтегруючу ланку з передаточною функцією

$$W_k(p) = \frac{1}{T_u p},$$

де  $T_u$  – постійна часу.

Тоді в закон регулювання вводять інтеграл від сигналу неузгодженості

$$X_2 = \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta X dt.$$

У цьому випадку закон регулювання, званий пропорційно-інтегральним (*ПІ-законом регулювання*), буде описуватися наступним рівнянням:

$$X_3 = k_1 \Delta X + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta X dt. \quad (1.28)$$

Відповідна йому передаточна функція

$$W_{nu}(p) = W_e(p) = \frac{k_1 T_u p + 1}{T_u p}. \quad (1.29)$$

Введення інтеграла в закон регулювання виключає статичну помилку САР, перетворюючи її в астатичну систему, але при цьому одночасно зменшуються запас стійкості і швидкодія системи.

В якості коригувальних елементів можна одночасно застосовувати ланки, що диференціюють й інтегрують. У цьому випадку виходить *ПІД-закон регулювання*, що реалізує алгоритм

$$X_3 = k_1 \Delta X + T_o \frac{d\Delta X}{dt} + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta X dt. \quad (1.30)$$

Спільне введення похідної і інтеграла забезпечує бажану швидкодію, необхідний запас стійкості і відсутність статичної помилки САР.

Для послідовної корекції статичних САР можна використати інтегруючу ланку, послідовно включене в канал прямого зв'язку САР. У такому випадку статична САР перетворюється в астатичну, у якій відсутня статична помилка. У результаті такого включення інтегруючої ланки виходить інтегральний закон (*I-закон*) регулювання:

$$X_{\text{вих}} = \frac{1}{T_u} \int_0^t X_{\text{вх}} dt. \quad (1.31)$$

де  $X_{\text{вих}}$ ,  $X_{\text{вх}}$  – відповідно вихідна й вхідна величина ланки (елемента).

Для цього закону регулювання передаточна функція

$$W_u(p) = \frac{1}{T_u p}.$$

Узагальнюючи викладене з огляду на результати аналізу різних законів регулювання [2...4], можна сформулювати наступні рекомендації з їхнього використання.

*ПІ-закон регулювання* рекомендується для об'єктів з невеликим запізнюванням і незначними змінами зовнішніх збурювань. Звичайно його застосовують у САР, що містять один та два об'єкти регулювання.

*I-закон регулювання* доцільно застосовувати в тих випадках, коли допускається великий час регулювання. Його не можна використати на об'єктах без самовирівнювання і з більшим запізнюванням, тому що процес регулювання може бути нестійким. Якщо I-закон

регулювання повинен забезпечувати роботу САР при зовнішньому впливі, що безупинно змінюється, то необхідно, щоб максимальна швидкість зміни регулюючого впливу перевищувала швидкість зміни зовнішнього впливу.

*Пі-закон регулювання* забезпечує працездатність САР практично як завгодно широкому діапазоні зміни зовнішніх збурювань.

*ПД-закон регулювання* можна використати в системах з більшим часом запізнювання.

*ПДД-закон регулювання* придатний для САР з більшим часом запізнювання, значними і різкими змінами зовнішніх впливів.

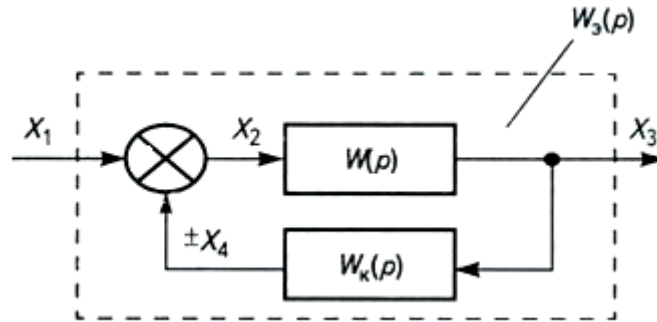


Рисунок 1.13. Структурна схема елемента САР, охопленого зворотним зв'язком

**Паралельна корекція САР**, як відзначено раніше, забезпечується за допомогою зворотних зв'язків. Зворотні зв'язки можуть бути *позитивні* або *негативні*, *тверді* або *гнучкі* (рисунок 1.13).

*Твердий зворотний зв'язок* формується, якщо передаточна функція коригувального елемента  $W_k(p) = k_k$ , тобто якщо коригувальний елемент використано безінерційна (пропорційна) ланка. Якщо як коригувальний елемент застосовують ідеально диференційну ланка з передаточною функцією  $W_k(p) = Tp$ , то одержують *гнучкий зворотний зв'язок*, що діє тільки в перехідному режимі роботи САР.

Ефективність і область застосування різних варіантів зворотних зв'язків для корекції САР можна усвідомити на наступних прикладах.

**Приклад 1.** Твердим зворотним зв'язком з передаточною функцією  $W_k(p) = k_k$ , охоплена аперіодична ланка (див. рисунок 1.13), що має передаточну функцію

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

При позитивному зворотному зв'язку еквівалентна передаточна функція

$$W_{e.n}(p) = \frac{W(p)}{1 - W(p)W_k(p)} = \frac{k}{Tp + 1 - k k_k}.$$

Розділивши знаменник і чисельник цього вираження на  $1 - k k_k$ , одержимо

$$W_{e.n}(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad (1.32)$$

де

$$k_1 = \frac{k}{1 - k k_k}; \quad T_1 = \frac{T}{1 - k k_k}.$$

Для негативного зворотного зв'язку

$$W_{\text{e.o}}(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (1.33)$$

$$\text{де } k_2 = \frac{k}{1 + k k_{\kappa}}; T_2 = \frac{T}{1 + k k_{\kappa}}.$$

З передаточних функцій (1.32), (1.33) видно, що тверді зворотні зв'язки не приводять до якісних змін охоплюваної аперіодичної ланки і не змінюють структурну схему системи, але змінюють постійну часу і передаточний коефіцієнт аперіодичної ланки.

Позитивний твердий зворотній зв'язок збільшує постійну часу  $T_1$  і коефіцієнт  $k_1$  еквівалентної аперіодичної ланки. Отже, вона зменшує швидкодню і запас стійкості системи. Якщо у вираженні (1.32)  $k k_{\kappa} > 1$ , то зворотній зв'язок перетворює стійку аперіодичну ланку в нестійку.

Негативний твердий зворотній зв'язок зменшує постійну часу  $T_2$  і передаточний коефіцієнт  $k_2$  еквівалентної аперіодичної ланки. Отже, вона збільшує швидкодню, стійкість і статичну помилку системи.

Охоплення аперіодичної ланки твердими зворотніми зв'язками можна застосовувати для корекції тільки структурно-стійких САР.

**Приклад 2.** Твердим зворотним зв'язком охоплена коливальна ланка системи (див. рисунок 1.13). Передаточні функції

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}; W_{\kappa}(p) = k_{\kappa}.$$

Виконавши ті ж перетворення, що й у попередньому прикладі, одержимо

$$W_{\text{e}}(p) = \frac{k_{\text{e}}}{T_{\text{e}2}^2 p^2 + T_{\text{e}1} p + 1}, \quad (1.34)$$

$$\text{де } k_{\text{e}} = \frac{k}{1 \pm k k_{\kappa}}; T_{\text{e}2}^2 = \frac{T_2^2}{1 \pm k k_{\kappa}}; T_{\text{e}1} = \frac{T_1}{1 \pm k k_{\kappa}}.$$

Знак «плюс» у знаменниках постійних часу і коефіцієнта передачі ставиться до негативного зворотного зв'язку, а «мінус» – до позитивного.

Еквівалентна передаточна функція  $W_{\text{e}}(p)$  не відрізняється від вихідної передаточної функції  $W(p)$ . Отже, введення твердого зворотного зв'язку навколо коливальної ланки не змінює структурної схеми САР.

З вираження (1.34) видно, що негативний зворотній зв'язок зменшує, а позитивний збільшує постійні часу  $T_{\text{e}2}$ ;  $T_{\text{e}1}$  і передаточний коефіцієнт  $k_{\text{e}}$ . Тому для поліпшення динамічних властивостей САР застосовують тверді негативні зв'язки. Причому їх можна використати тільки в структурно-стійких системах.

**Приклад 3.** Твердий негативний зворотній зв'язок  $[W_{\kappa}(p) = k_{\kappa}]$  охоплює інтегруючу ланку системи (див. рисунок 1.13), передаточна функція якого

$$W(p) = 1/(Tp).$$

Еквівалентна передаточна функція

$$W_{e.o}(p) = \frac{1/(Tp)}{1 + k_k/(Tp)} = \frac{1}{Tp + k_k} = \frac{k_s}{T_e p + 1}, \quad (1.35)$$

де

$$k_e = 1/k_k, \quad T_e = T/k_k.$$

З передаточної функції (1.35) видно, що при охопленні інтегруючої ланки твердим негативним зворотним зв'язком еквівалентна передаточна функція буде відповідати аперіодичній ланці, тобто структурна схема САР зміниться.

Цей метод корекції можна застосовувати для поліпшення динамічних властивостей (стійкості і якості регулювання) і для перетворення структурно-нестійких систем у структурно-стійкі або астатичні системи у статичні.

**Приклад 4.** Гнучкий зворотний зв'язок  $[W_k(p) = T_o p]$  охоплює аперіодичну ланку з передаточною функцією  $W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$  (див. рисунок 1.13).

Еквівалентна передаточна функція

$$\begin{aligned} W_{e.a}(p) &= \frac{k/(Tp + 1)}{1 \pm \frac{kT_o p}{Tp + 1}} = \frac{k}{(Tp + 1) \pm kT_o p} = \\ &= \frac{k}{(T \pm kT_o)p + 1} = \frac{k}{T_{ea} p + 1}, \end{aligned} \quad (1.36)$$

де  $T_{ea} = T \pm kT_o$  – постійна часу еквівалентної ланки (знак «плюс» для негативного зв'язку, «мінус» для позитивної).

Аналіз передаточної функції (1.36) показує, що гнучкий негативний зворотний зв'язок збільшує постійну часу  $T_{ea}$ , а гнучка позитивна зменшує її. При цьому коефіцієнт передачі  $k$  не змінюється.

При введенні гнучкого негативного зв'язку навколо аперіодичної ланки підвищуються стійкість і якість перехідного процесу (замість загасаючого коливального можна одержати монотонний перехідний процес), але при цьому знижується швидкодія системи.

**Приклад 5.** Гнучкий зворотний зв'язок  $[W_k(p) = T_o p]$  введений навколо інтегруючої ланки з передаточною функцією  $W_u(p) = \frac{1}{T_u p}$  (див. рисунок 1.13). У цьому випадку еквівалентна передаточна функція

$$W_{e.и}(p) = \frac{1}{(T_u \pm T_o)p}. \quad (1.37)$$

З передаточної функції (1.37) видно, що гнучкий зворотний зв'язок не змінює структурну схему інтегруючої ланки, але змінює його постійну часу: вона збільшується при негативному зв'язку і зменшується при позитивному. Даний метод корекції застосовують для перетворення нестійкої системи в стійку або для поліпшення якості регулювання.

У розглянутих методах корекції САР використані ідеально диференціююча і інтегруюча ланки, які реалізувати на практиці простими засобами дуже складно. Тому для корекції автоматичних систем часто використовують більш прості, так звані реальні диференціюючу і інтегруючу ланки.

Схеми і передаточні функції деяких ідеальних і реальних коригувальних елементів показані в таблиці 1.1.

### 1.1. Ідеальні й реальні електричні коригувальні елементи

| Тип елемента                                                                  | Схема | Передаточна функція                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ідеальний диференційний елемент на операційному підсилювачі                   |       | $W(p) = -Tp;$ $T = RC$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Реальний диференційний елемент у вигляді RC-контрури                          |       | $W(p) = \frac{Tp}{Tp + 1};$ $T = RC$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Реальний диференційний елемент у вигляді RC-контрури з активним навантаженням |       | $W(p) = \frac{Tp}{Tp + 1};$ $T = \frac{RR_n}{R + R_n} C$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Диференційний ненавантажений трансформатор                                    |       | $W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1};$ $k = w_2 / w_1;$ $T = L_1 / R_1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Диференційний трансформатор активним навантаженням                            |       | $W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1};$ $k = w_2 / w_1;$ $T = \frac{M}{R_1} \approx \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Диференційний трансформатор, навантажений індуктивно-активним навантаженням   |       | Вхідна величина $I_1$ , вихідна $I_2$<br>$W(p) = \frac{I_2(p)}{I_1(p)} = \frac{kT_1 p}{T_2 p + 1};$ $k = \frac{R_1 w_2}{(R_2 + R_n) w_1}; \quad T_1 = \frac{L_1}{R_1};$ $T_1 = \frac{L_2 + L_n}{R_2 + R_n}$<br>Вхідна величина $U_{вх}$ , вихідна $I_2$<br>$W(p) = \frac{I_2(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{kT_1 p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)};$ $k = \frac{R_i w_2}{(R_2 + R_i) w_1}$ |
| Ідеальний інтегруючий елемент операційного підсилювача                        |       | $W(p) = -\frac{1}{Tp};$ $T = RC$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

#### 1.2.4. Оптимізація Системи Автоматичного Регулювання

**Оптимальною системою** називають автоматичну систему з найкращими якість по якому-небудь показнику. Наприклад, стосовно до САР система, оптимальна по швидкодії, здійснює найбільш швидкий перехід з одного сталого стану в інший; система, оптимальна по середньому квадратичному відхиленню регульованої величини від її заданого значення, забезпечує найвищу в певних умовах точність регулювання. У загальному випадку автоматичні системи можуть бути оптимальними по витратах енергії, продуктивності, по якості продукції, надійності і по цілому ряді інших показників.

Для кожної конкретної оптимальної системи встановлюють певний **критерій оптимальності**, під яким розуміють якесь число, що залежить від параметрів системи або алгоритму її Функціонування (закону керування або регулювання), критерій оптимальності, що виражає в якій-небудь математичній формі, становлять так, щоб за допомогою його мінімізації одержати задовільні результати керування.

Оптимізацію САР часто проводять із метою досягнення найкращих показників якості регулювання. Прикладні програми для комп'ютерного моделювання автоматичних систем, у тому числі і ПК «МВТП», забезпечують оптимізацію на основі інтегральних критеріїв оцінки якості процесу регулювання. При такій оптимізації, названій параметричною, з множини можливих перехідних процесів САР для різних оптимальних параметрів вибирається перехідний процес із мінімальним значенням одного з інтегральних критеріїв якості. Як критерій оптимальності при цьому доцільно використання функціонала

$$S_1 = \int_0^{\infty} \Delta x^2 dt, \quad (1.38)$$

де  $\Delta x = x_0 - x$  – сигнал неузгодженості, що представляє собою функцію часу:  $\Delta x = f(t)$ ;  $x_0$ ,  $x_1$  – відповідно, задаючий сигнал, і сигнал зворотного зв'язку САР.

Функціонал (1.38) однозначно залежить від середнього квадратичного відхилення регульованої величини (середньої квадратичної помилки) САР і геометрично інтерпретується як площа  $S$  під графіком  $\Delta x^2 = f^2(t)$  (рисунок 1.14).

Іноді оптимізація САР на основі функціонала (1.38) не дає позитивного результату - у процесі моделювання виходить тривалий коливальний процес. Це порозумівається наступної.

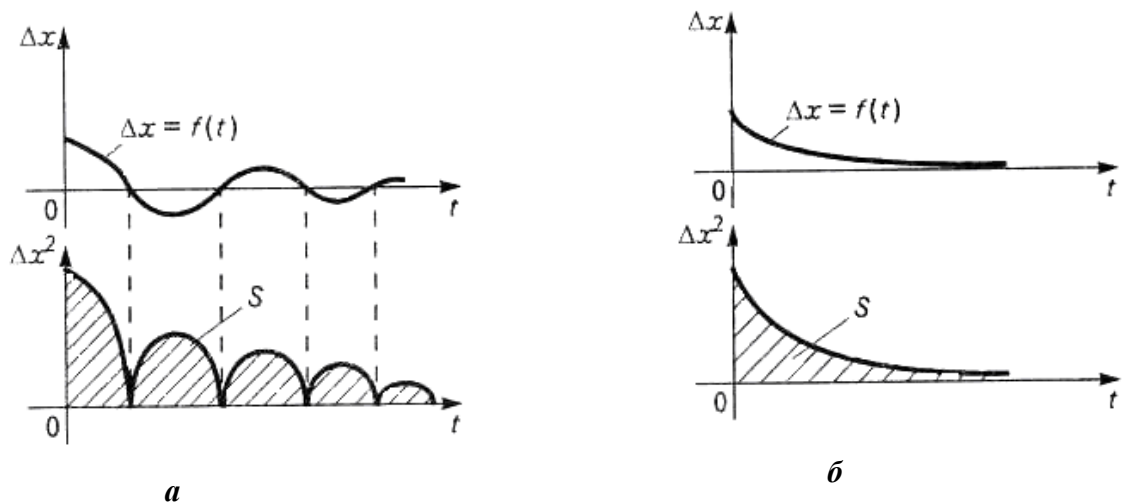


Рисунок 1.14. До геометричної інтерпретації функціонала (1.38) при перехідних процесах:

*a* – коливальному; *б* – аперіодичному

Квадратичний інтегральний показник якості (1.38) оцінює процес по сумі площ по графіках  $\Delta x^2$ . За певних умов монотонний і коливальний процеси можуть мати таке співвідношення площ, при якому коливальний перехідний процес представляється кращим, чим монотонний. У такому випадку варто використати більше складну інтегральну оцінку якості у вигляді функціонала

$$S_2 = \int_0^{\infty} \left[ \Delta x^2 + T^2 \left( \frac{d\Delta x}{dt} \right)^2 \right] dt, \quad (1.39)$$

де  $T$  – постійна часу ідеалізованого експонентного перехідного процесу.

Критерій оптимальності (1.39) на відміну від оцінки (1.38) ураховує плавність перехідного процесу за рахунок швидкості зміни регульованої величини.

Розглядаючи постійну часу  $T$  як варіаційний параметр, за допомогою його підбір в процесі комп'ютерної оптимізації САР, можна одержати необхідний оптимальний перехідний процес регулювання. При цьому граничне максимальне значення  $T$  у процесі варіації варто задавати орієнтовно з урахуванням значення необхідної тривалості часу регулювання  $t_p$  (див. рисунок 1.7).

Доцільність використання квадратичних критеріїв (1.38), (1.39) при параметричній оптимізації обумовлена тим, що їх можна застосовувати як при коливальних, так і при аперіодичних перехідних процесах САР. У цьому зв'язку необхідно відзначити наступне: якщо заздалегідь відомо, що в САР відбуваються тільки аперіодичні перехідні процеси, то оптимізацію можна проводити по мінімуму функціонала

$$S_3 = \int_0^{\infty} \Delta x dt. \quad (1.40)$$

За допомогою комп'ютерних моделюючих програм на основі критеріїв (1.38), (1.39) і (1.40) можна не тільки виконати параметричну оптимізацію САР, але й підібрати найкращий закон регулювання з розглянутих раніше - (1.22), (1.24), (1.28), (1.30), (1.31) або необхідний коригувальний елемент із оптимальними параметрами.

### **1.2.5. Спрощення математичних моделей Системи Автоматичного Регулювання з урахуванням малих параметрів**

Значення параметрів елементів САР можуть розрізнятися на один або кілька порядків. У такому випадку параметри з меншими значеннями можна розглядати як малі параметри. Установлено, що малі параметри в більшості випадків несуттєво впливають на перехідний процес і ними без шкоди для точності дослідження можна зневажити. Це приводить до зниження порядку САР і спрощенню дослідження.

У деяких випадках відкидання малих параметрів сильно спотворює перехідний процес і може послужити причиною помилки. Тому дуже важливо оцінити вплив малих параметрів на поведінку системи автоматичного регулювання.

До параметрів елементів САР ставляться постійні часу й коефіцієнти передачі. Коефіцієнти передачі елементів входять співмножниками в загальний коефіцієнт підсилення системи, тому зневажити ними не можна в жодному разі. Постійні часу при їхній відносній малості можна в ряді випадків відкидати.

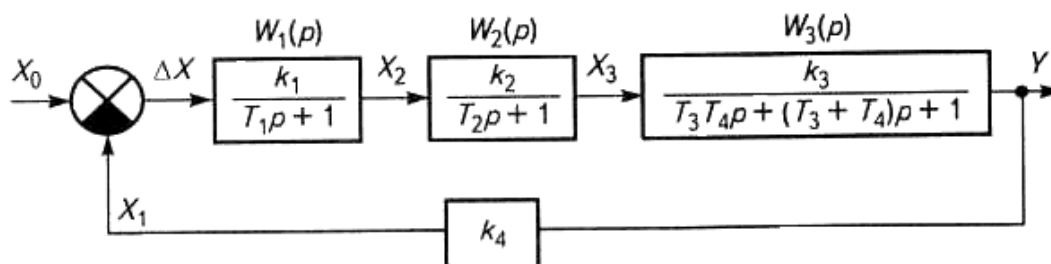


Рисунок 1.15. Структурна схема САР

Відносно малими постійними часу вважаються в тому випадку, якщо вони менше інших найближчих за значенням постійних на один або кілька порядків (тобто в 10, 100 разів і більше). Для САР, структурна схема якої показана на рисунку 1.15, постійні часу мають значення:  $T_1 = 0,05$  с;  $T_2 = 0,1$  с;  $T_3 = 0,2$  с;  $T_4 = 1$  с. Постійна часу  $T_1$  менше наступної постійної  $T_2$  усього лише в 2 рази,  $T_2$  менше  $T_3$  теж в 2 рази, а  $T_3$  менше  $T_4$  в 5 разів. Жодна постійна часу не може вважатися досить малою, щоб її можна було б відкинути. Якби постійна часу  $T_1$  була менше або дорівнювала 0,01 с, то нею можна зневажити, тому що вона на один порядок менше постійної часу  $T_2 = 0,1$  с.

Малі постійні часу можна відкидати в одноконтурних САР. У багатоконтурних системах їх можна відкидати в елементах, що входять у контур головного зворотного зв'язку, і в жодному разі відкидати не можна, якщо ці постійні характеризують елементи, що входять у місцеві зворотні зв'язки. Це розуміється тим, що постійні часу елементів зворотного зв'язку перемножуються з постійними часу охоплених ланок, внаслідок чого вони істотно впливають на перехідний процес системи.

Відкидання одної постійної часу знижує порядок САР на одиницю, і всі подальші дослідження можна виконувати за допомогою спрощеної структурної схеми. Однак у тих випадках, коли при дослідженні спрощеної системи вона виявляється близької до границі стійкості, її стійкість варто перевірити по повній структурній схемі, тому що відкидання малих параметрів іноді може привести стійку систему до нестійкого.

Відкидання малих постійних часу приводить до втрати в характеристичному рівнянні САР корінь із більшими абсолютними значеннями потрібної частини, які відповідають швидко загасаючим складовим перехідного процесу, що вносить деяку погрішність на самому початку перехідного процесу. Це справедливо в тому випадку, коли робочі частоти системи відносно низькі, що звичайно має місце при автоматизації технологічних процесів. Ланки з більшими постійними часу не пропускають високих частот, перехідні процеси відбуваються відносно повільно, і робочими виявляються тільки низькі частоти (повільні зміни впливів). Отже, відкидання малих параметрів цілком припустимо.

Якщо об'єкт регулювання має більшу постійну часу (наприклад, теплиця), а постійні часу ланок, що входять у регулятор, на багато порядків менше, то, не вносячись помітної погрішності, всі малі постійні часу можна прирівняти нулю й привести порядок системи до порядку рівняння регульованого об'єкта, що істотно спрощує дослідження.

З обліком викладеного як приклад можна спростити структурну схему САР температури в інкубаторі (див. рисунок 1.3) за рахунок відкидання постійної часу термопари  $T_T = 8 \dots 10$  с, тому що вона в 30 разів менше постійної часу нагрівача  $T_p = 300$  с і в 190 разів менше постійної часу камери інкубатора  $T_k = 1800$  с. Таким чином, термопару стосовно до даного САР можна розглядати як пропорційну ланку з передаточною функцією  $W_T(p) = k_T$ .

### **Контрольні питання**

1. Що таке математична модель технічної системи?
2. Який принцип роботи САР?
3. Які існують методи визначення математичних моделей елементів й об'єктів регулювання автоматичних систем?
4. Яка сутність аналітичного методу відшукування математичних моделей елементів й об'єктів регулювання автоматичних систем?
5. Що таке передаточні функції елементів й об'єктів регулювання автоматичних систем?
6. Що таке структурна схема САР? Як створюють структурні схеми САР?
7. Що являють собою лінійні й нелінійні САР? Яка сутність лінеаризації нелінійних елементів САР?
8. Які сутність і мета комп'ютерного моделювання САР?
9. Як оцінюють стійкість САР у результаті їхнього комп'ютерного моделювання?
10. Як оцінюють якість САР за результатами їхнього комп'ютерного моделювання?
11. Які показники якості САР визначають по перехідних характеристиках?
12. З якою метою проводять корекцію САР? Що таке послідовна й паралельна корекція САР?
13. Які сутність й область використання типових законів регулювання (П-, ПД-, ПІ-, ПІД-законів регулювання)?
14. Що таке тверді й гнучкі зворотні зв'язки?
15. Яку систему називають оптимальною? Що таке критерій оптимальності?
16. Як оцінити якість САР на основі інтегральних оцінок якості?
17. Яка сутність параметричної оптимізації САР?
18. Що таке малі параметри? Як з їхнім обліком можна спростувати математичні моделі САР?

## **2. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МВТУ І РЕКОМЕНДАЦІЇ З ЙОГО ВИКОРИСУНОКТАННЯ**

### **2.1.ПРИНЦИПИ Й МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

У програмному комплексі «Моделювання в технічних пристроях» (ПК МВТУ) використаний метод структурного моделювання, що базується на математичних моделях САР у вигляді їхніх структурних схем (див. п. 1.1).

У ПК «МВТУ» прийнята графічна форма введення вихідних даних у комп'ютер у вигляді структурної схеми моделювання САР, що складають із використанням відповідних блоків, наявних у бібліотеках програмного комплексу (додаток А). По зовнішньому вигляді структурна схема моделювання повністю повторює вихідну структурну схему САР з додаванням спеціальних блоків для формування зовнішніх впливів на систему (задаючого і обурюючого впливів) і реєстрації перехідних процесів. Можливість графічного введення вихідних даних забезпечується наявністю в ПК «МВТУ» графічного й текстового редактори, а також бібліотеки графічних представлень функціональних блоків і діалогових засобів навчання користувача.

Графічно представлена математична модель САР у вигляді її структурної схеми, введена в комп'ютер, за допомогою програмних засобів ПК «МВТУ» автоматично перетвориться в систему рівнянь у формі Коші й вирішується чисельними методами інтегрування.

Вихідні дані для введення в комп'ютер готують у такій послідовності.

**Етап 1.** З використанням блоків із ЗАГАЛЬТЕХНІЧНОЇ бібліотеки ПК «МВТУ» (див. додаток А), що відповідають ланкам вихідної структурної схеми, складають структурну схему моделювання САР. При цьому варто враховувати, що під символом 5 у передаточних функціях динамічних блоків бібліотеки ПК «МВТУ» розуміється символ  $p$ , використовуваний у деяких підручниках і навчальних посібниках з автоматики [2...5]. На структурній схемі моделювання САР зображують блоки, що формують задаючий і обурюючий впливи (з бібліотеки «Джерела вхідних сигналів»), а також блок для фіксації графіка перехідного процесу на виході системи (з бібліотеки «Дані»).

**Етап 2.** На основі аналізу значень параметрів передаточних функцій САР вибирають метод і задають параметри інтегрування (точність, крок і час інтегрування), а також визначають число крапок виводу результатів моделювання.

ПК «МВТУ» реалізує кілька методів інтегрування. При моделюванні САР рекомендується використати один з методів Рунге-Кутта або адаптивних методів.

Точність інтегрування задають (виходячи з умов збіжності чисельного рішення завдання) десятковим числом: наприклад, 0,001 (0,1 %).

Крок інтегрування задають двома значеннями: максимальним і мінімальним. При цьому максимальне значення кроку інтегрування приймають в 5...10 разів менше найменшої постійної часу вихідної САР. Мінімальне значення кроку інтегрування приймають в 10...100 разів менше максимального значення кроку інтегрування. Якщо в процесі моделювання не забезпечується задана точність інтегрування, то мінімальний крок інтегрування зменшують до значень, при яких буде досягнута задана точність.

Час інтегрування орієнтовно задають на один-два порядків більше, ніж сама більша постійна часу вихідної САР. У процесі моделювання час інтегрування  $t_u$  уточнюють. Воно повинне бути не менше часу регулювання  $t_p$  (рисунок. 2.1).

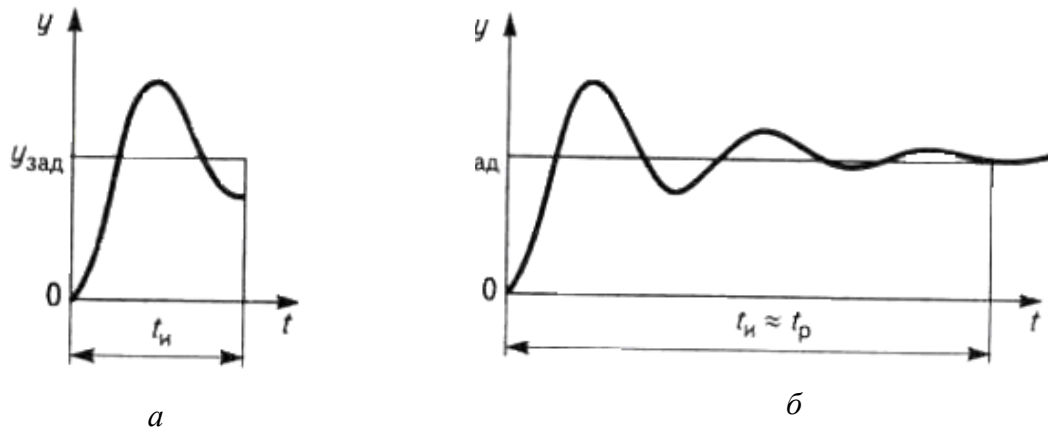


Рисунок 2.1. До вибору часу інтегрування:

- а – час інтегрування прийнятий недостатнім (перехідний процес за час інтегрування ще не загас);
- б – час інтегрування прийнятий достатнім (перехідний процес практично загас, і час інтегрування  $t_u$  приблизно дорівнює часу регулювання  $t_p$ )

Число крапок  $n$  видачі даних орієнтовно визначають по співвідношенню

$$n \approx \frac{t_u}{(1...5) \Delta t_{\max}}, \quad (2.1)$$

де  $\Delta t_{\max}$  – максимальне значення кроку інтегрування.

У процесі моделювання число крапок можна змінювати й уточнювати, виходячи з вимог до якості зображення графіка перехідного процесу.

Підготовлені вихідні дані за допомогою відповідних процедур (вони розглянуті в п. 2.6) уводять у комп'ютер і виконують моделювання САР. У результаті моделювання одержують графік перехідного процесу, на основі аналізу якого досягають необхідних цілей (див. п. 1.2).

**Приклад.** Розглянемо підготовку вихідних даних для моделювання перехідних процесів САР напруги синхронного генератора (рисунок. 2.2).

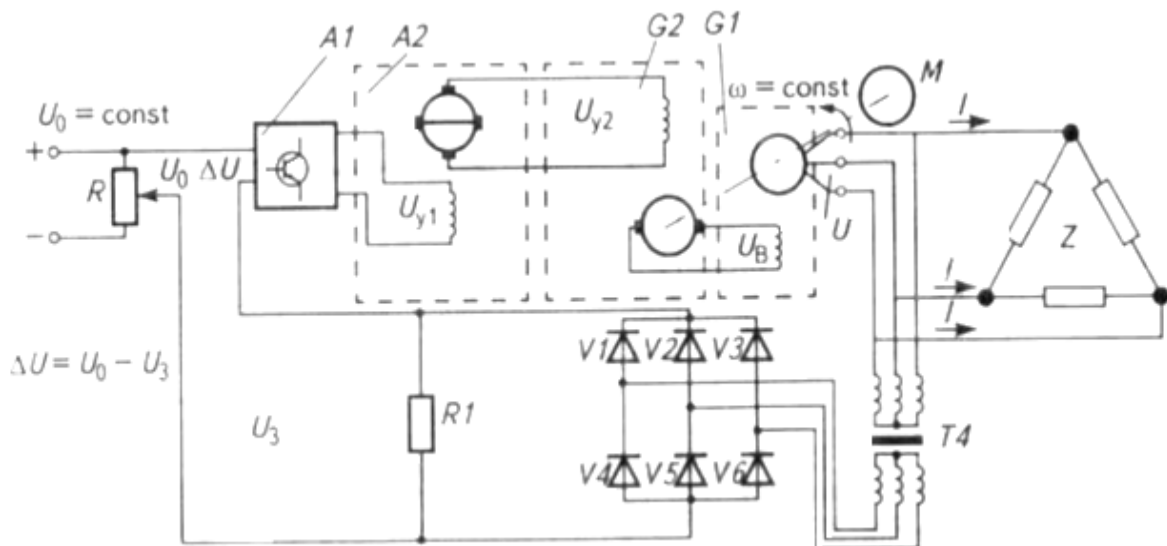


Рисунок 2.2. Принципова схема САР напруги синхронного генератора:

САР призначена для стабілізації напруги на затискачах синхронного генератора при змінах його струму навантаження. Її принцип роботи наступний.

Напруга генератора  $U$  вимірюється трансформатором  $T4$  і випрямлячем  $V1...V6$  перетворюється в напругу  $U_3$ . Напруга  $U_3$  подається на вхід системи зустрічно, задаючи напругу,  $U_0$ . У результаті виходить різниця напруг  $\Delta U = U_0 - U_3$ . При зменшенні напруги  $U$  різниця  $\Delta U$  зростає, що приводить до збільшення напруги порушення  $U_B$  генератора і до відновлення напруги  $U$  до заданого значення. При збільшенні напруги  $U$  різниця  $\Delta U$  зменшується, що викликає зниження напруги порушення генератора, а отже, і напруги  $U$  до необхідного значення. Таким чином, саме відхилення керованої величини (напруги генератора) від заданого значення викликає зміна регулюючого впливу (напруги порушення), що приводить до зменшення цього відхилення.

Функціональна й структурна схеми САР показані відповідно на рисунках 2.3 й 2.4.



Рисунок 2.3. Функціональна схема САР напруги синхронного генератора:

ОР – об'єкт регулювання; В – сприймаючий орган; ПО – перетворюючий орган;  
 ЗО – орган, що задас; З – орган, що порівнює; В01, В02 – підсилювальні органи;  
 В0 – виконавчий орган.

Передаточні функції об'єкта регулювання САР (синхронного генератора) по регулюючому і збурюючому впливах відповідно наступні:

$$W_p(p) = \frac{k'_0}{T_0 p + 1}; \quad W_B(p) = -k''_0,$$

де  $k'_0, k''_0$  – передаточні коефіцієнти:  $k'_0 = 30$ ,  $k''_0 = 2,64$  В/А;  $T_0$  – постійна часу:  $T_0 = 1,2$  с.

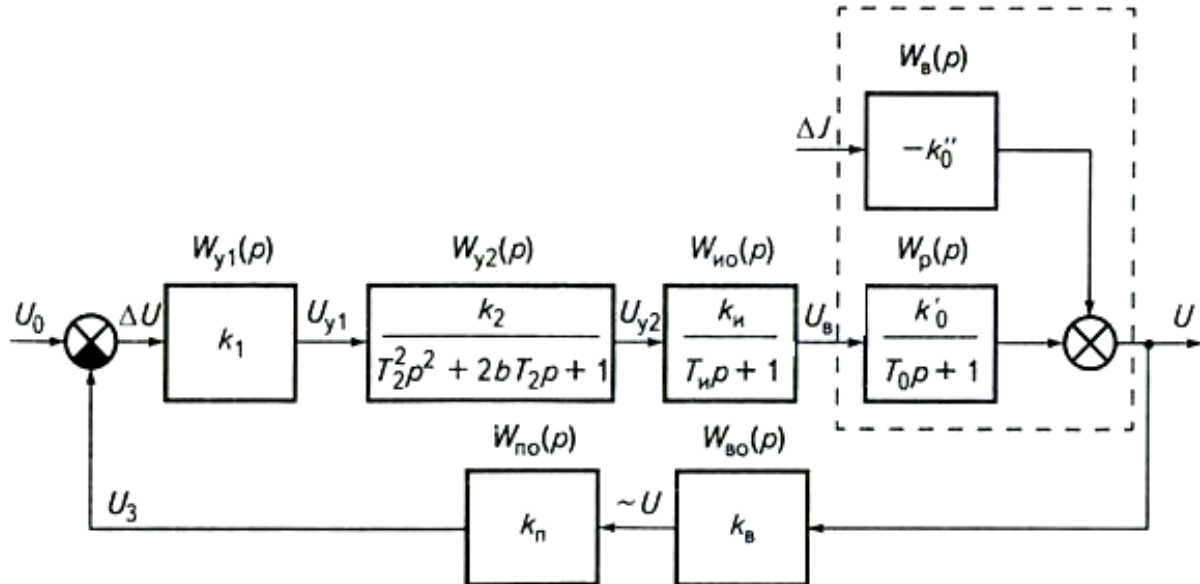


Рисунок 2.4. Структурна схема САР напруги синхронного генератора:

Передаточна функція сприймаючого органа

$$W_{B.O}(p) = k_B,$$

де  $k_B$  – передаточний коефіцієнт трансформатора (коефіцієнт трансформації):  $k_B = 0,001$ .

Передаточна функція перетворюючого органа (трифазного випрямляча)

$$W_{п.о}(p) = k_{п},$$

де  $k_{п}$  – передаточний коефіцієнт (для схеми Ларіонова):  $k_{п} = 2,34$ .

Передаточна функція підсилювального органа ПО<sub>1</sub> (електронного підсилювача)

$$W_{y1}(p) = k_1,$$

де  $k_1$  – коефіцієнт підсилення електронного підсилювача по напрузі:  $k_1 = 10...25$ .

Передаточна функція підсилювального органа ПО<sub>2</sub> (електромашинного підсилювача)

$$W_{y2}(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2bT_2 p + 1},$$

де  $k_2$  – коефіцієнт підсилення електромашинного підсилювача по напрузі:

$k_2 = 2$ ;  $T_2$  – постійна часу:  $T_2 = 0,15$  с ( $T_2^2 = 0,0225$  с<sup>2</sup>);  $b$  – коефіцієнт демпфірування:  $b = 1,17$ .

Передаточна функція виконавчого органа (збудника)

$$W_{u.o}(p) = \frac{k_u}{T_u p + 1},$$

де  $k_u$  – передаточний коефіцієнт:  $k_u = 2$ ;  $T_u$  – постійна часу:  $T_u = 0,5$  с.

Номинальна напруга генератора  $U_H = 6300$  В.

Вхідні впливи САР:

Задаючий вплив,  $U_0 = 18,7$  В;

максимальний обурюючий вплив (скидання струму навантаження генератора від номінального значення  $I_H = 688$  А до значення струму холостого ходу генератора  $I_{х.х} = 0$ ).

Начальні нульові умови.

Порядок складання структурної схеми моделювання САР (рисунок 2.5) наступний:

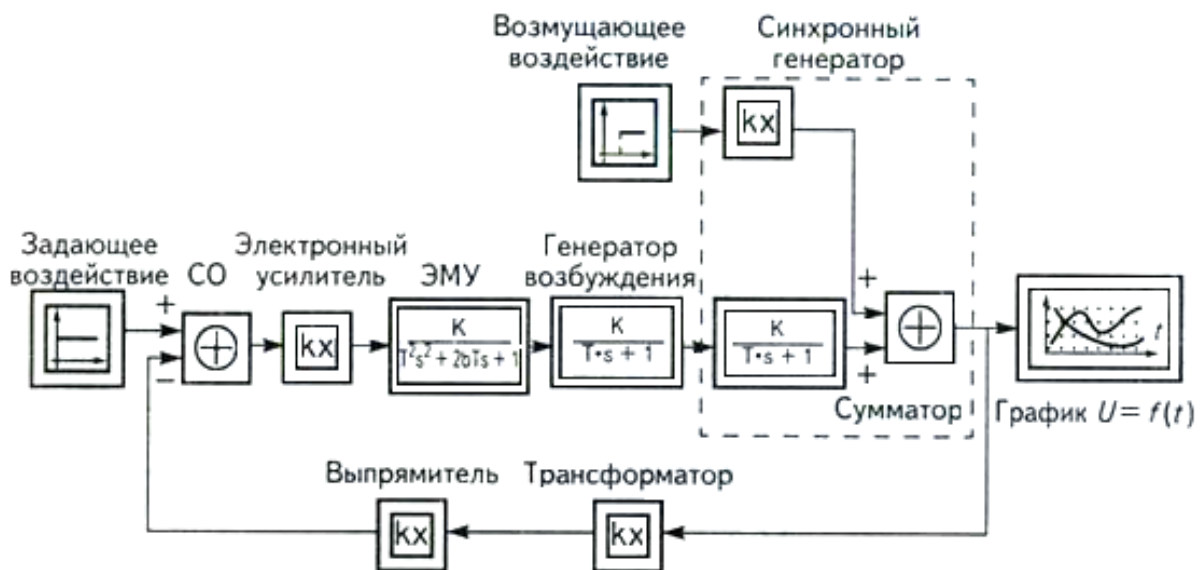


Рисунок 2.5. Структурна схема моделювання САР

- кожна ланка вихідної структурної схеми (див. рисунок 2.4) замінюємо відповідним блоком із ЗАГАЛЬТЕХНІЧНОЇ бібліотеки ПК «МВТП»;
- для формування задаючого впливу,  $U_0$  використаємо блок Константа, а обурюючого впливу  $\Delta I$  — блок *Східчастий вплив* з бібліотеки «Джерела входних сигналів».

Обираємо метод і задаємо параметри інтегрування:

метод інтегрування «Адаптивний 1»;

виходячи з найменшої постійної часу  $T_1 = 0,05$ с, приймаємо первісні значення кроку інтегрування: максимального 0,005 с, мінімального 0,0001 с;

виходячи з найбільшої постійної часу  $T_0 = 0,8$  с, приймаємо первісне значення часу інтегрування 8 с;

точність інтегрування 0,001.

Число крапок видачі даних орієнтовно розраховуємо по формулі (2.1):

$$n = \frac{8}{5 \cdot 0,005} = 320.$$

## 2.2. ПУСК ПК МВТУ

ПК «МВТП» у середовищі Windows (версії '95, '98 й NT) може бути запущений за допомогою меню **Пуск** і команди **Виконати**, Провідника програм або спеціально створеної для пуску піктограми.



Рисунок 2.6. Верхня частина Головного Вікна ПК «МВТУ»

Після пуску ПК на екрані монітора з'являється заставка з реквізитами авторів програмного комплексу «МВТУ» і фотографією головного корпусу МГТУ ім. Н. Э. Баумана, потім – **Головне Вікно** програмного комплексу «МВТУ» (рисунок 2.6). У верхній частині **Головного Вікна** розташоване *Командне меню*, під ним – *Панель інструментів* (командних кнопок), а нижче – *Лінійка типових блоків* з відповідними піктограмами й закладками назв окремих бібліотек, сформованих по функціональному принципі.

## 2.3. КОМАНДНЕ МЕНЮ ГОЛОВНОГО ВІКНА

**Головне Вікно** програмного комплексу має наступне меню:

### Файл:

Створити (F3)

Відкрити (Ctrl + F3)

Зберегти (F2)

Зберегти як (Ctrl + F2)

Зберегти субмодель

Вставити субмодель

Протокол

Печатка (Ctrl + P)

Установки печатки

Вихід із МВТП

### Виправлення:

Копіювати (Ctrl + Ins)

(Shift + Del)

(Shift + Ins)

(Ctrl + A)

### Опції:

Побачити виділення (Shift + F5)

Побачити всю схему (Ctrl + F5)

Виключити блок (Ctrl + F6)

Включити блок (Shift + F6)

Заморозити блок

Розморозити блок

Пошук блоку

Повторити пошук блоку (Ctrl + R)

Пошук змінної

Повторити пошук змінної (Ctrl + G)

### Стиль:

Шрифт підпису блоку (Ctrl + F)

Кольори ліній (Ctrl + Z)

Підпис блоку (назва/ім'я/немає)

Малювати обрамлення

Фон блоку (Ctrl + B)

Фон вікна (Ctrl + W)

#### Моделювання:

Почати (F9)

Зупинити (Shift + F9)

Продовжити (Ctrl + F9)

Пауза

#### Оптимізація:

Почати

Закінчити

Параметри

Очистити імена блоків

Очистити підпису блоків

Параметри розрахунку (F10)

Інформація про розрахунок

Емуляція з розрахунку

#### Аналіз:

Частотний аналіз

?:

Зміст

Про програму

Примітки: 1. У ПК «МВТУ» за допомогою меню «?» і опції *Зміст* викликається зміст всієї контекстної довідкової системи.

2. Комбінацією клавіш **Ctrl + F1** при ініціалізованому (виділеному) типовому блоці викликається довідка по цьому блоці.

Частина команд реалізована за допомогою *Додаткового командного меню*, що викликають натисканням *правої* клавіші миші при розташуванні її курсору у вільному місці Схемного Вікна. На рисунку 2.7 на фоні Схемного Вікна представлено *Додаткове командне меню*, що містить 13 додаткових інтерфейсних опцій.

Опції *Зовнішні сигнали...*, *Параметри макроблоку* і *Показати алгебраїчні петлі...* забезпечують:

опис зовнішніх (стосовно ПК «МВТП») вхідних сигналів;

завдання *Глобальних параметрів проекту* при активному Головному Схемному Вікні або *Глобальних параметрах макроблоку* (субмоделі) при активному субмоделльному вікні;

вивід списку визначальних блоків з наступним виділенням жирними лініями зв'язків виявлених алгебраїчних контурів.

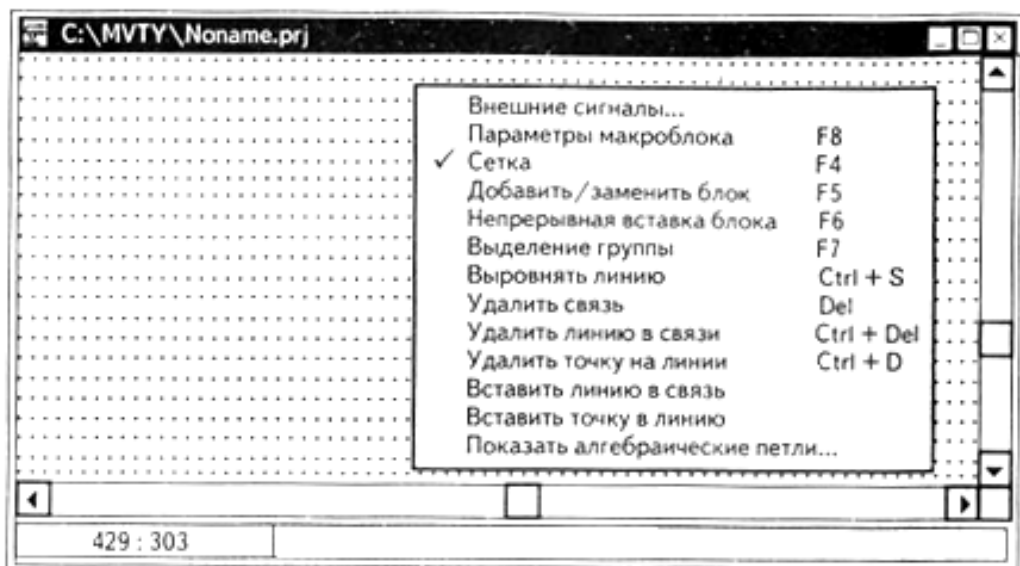


Рисунок 2.7. Схемне Вікно з Додатковим командним меню

## 2.4. ПАНЕЛЬ ІНСТРУМЕНТІВ ГОЛОВНОГО ВІКНА

Головне Вікно має спеціальні кнопки, що реалізують команди й опції (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Спеціальні (командні) кнопки

| Зображення й назва кнопки                                                                                 | Призначення кнопки                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Новий                | Відкриває Схемне Вікно нового проекту (завдання)                                                                                                                                                                                                    |
| <br>Открыть              | Відкриває вікно зчитування з диска раніше створеної структурної схеми динамічного завдання (за замовчуванням викликається кореневий каталог із вказівкою файлів, що мають розширення <b>.prj</b> )                                                  |
| <br>Сохранить            | Зберігає структурну схему й параметри (за замовчуванням файл із розширенням <b>.prj</b> ), включаючи метод, параметри інтегрування, вікна відображення результатів розрахунку і інше.                                                               |
| <br>Печать               | Забезпечує вивід на принтер (друк) обраного Схемного Вікна або фрагмента структурної схеми                                                                                                                                                          |
| <br>Вырезать             | Видаляє виділений блок або фрагмент структурної схеми зі збереженням його в буфері обміну                                                                                                                                                           |
| <br>Копировать           | Копіює виділений блок або фрагмент структурної схеми в буфер обміну                                                                                                                                                                                 |
| <br>Вставить           | Копіює в Схемне Вікно вміст буфера обміну                                                                                                                                                                                                           |
| <br>Выделить все...    | Виділяє повністю вміст активного Схемного Вікна                                                                                                                                                                                                     |
| <br>Увидеть всю Схему  | Перетворить зображення всієї структурної схеми проекту в поточний розмір Схемного Вікна                                                                                                                                                             |
| <br>Показать выделение | Змінює виділений фрагмент структурної схеми проекту в поточний розмір Схемного Вікна                                                                                                                                                                |
| <br>Параметры счета    | Викликає діалогове вікно вибору методу інтегрування, установки часу, кроку інтегрування, точності і т.д.                                                                                                                                            |
| <br>Стоп               | Завершує розрахунок зі збереженням в оперативній пам'яті параметрів моделі і стану систем                                                                                                                                                           |
| <br>Продолжить         | Запускає відразу завдання (проект), якщо команда <b>Старт</b> не виконувалася; «допускає» завдання, якщо команда <b>Старт</b> виконувалася; продовжує процес моделювання до кінцевого часу, якщо він був перерваний кнопкою (командою) <b>Пауза</b> |
| <br>Пауза              | Перериває процес розрахунку зі збереженням в оперативній пам'яті параметрів моделі й поточного стану системи                                                                                                                                        |
| <br>Исключить блок     | Виключає блок (групу блоків) з динамічної моделі (фон блоку офарблюється чорними кольорами)                                                                                                                                                         |

Продовження таблиці 2.1.

| Зображення й<br>назва кнопки                                                                                          | Призначення кнопки                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Включить<br>блок                 | Включає раніше виключений блок (або групу блоків) у динамічну модель (повертає вихідний фон блоку)                                                                                                                                                                          |
| <br>Заморозить                       | Підтримує (у процесі моделювання) постійним сигнал на виході з будь-якого блоку, у тому числі й у режимі on-line (буква М означає мороз)                                                                                                                                    |
| <br>Разморозить                      | Скасовує команду <i>Заморозить</i> (буква Т означає тепло)                                                                                                                                                                                                                  |
| <br>Параметры<br>макроблока          | При активному Головному Схемному Вікні відкриває <i>Вікно глобальних параметрів проекту</i> (за допомогою <i>Редактора інтерпретатора математичних функцій</i> ), а при активному субмоделльному Схемному Вікні – <i>Вікно глобальних параметрів макроблоку</i> (субмоделі) |
| <br>Справка                          | Відкриває вікно контекстної довідкової системи ПК «МВТП»                                                                                                                                                                                                                    |
| <br>Поиск блока                      | Відкриває діалогове вікно <i>Поиск блока</i> в структурній схемі по ряду відмітних ознак (типу блоку, назві блоку й т.п.)                                                                                                                                                   |
| <br>Продолжить<br>поиск блока       | Продовжує пошук блоків у структурній схемі по обраній відмітній ознаці (типу блоку, назві блоку й т.п.)                                                                                                                                                                     |
| <br>Поиск переменной               | Відкриває діалогове вікно <i>Поиск переменной</i> в структурній схемі по ряду відмітних ознак (імені глобальної змінної, джерелу змінної або посиланню на змінну)                                                                                                           |
| <br>Продолжить<br>поиск переменной | Продовжує пошук змінної в структурній схемі по обраній відмітній ознаці (імені глобальної змінної, джерелу змінної або посиланню на змінну)                                                                                                                                 |
| <br>Выйти                          | Завершує сеанс роботи в середовищі ПК із пропозицією зберегти поточну структурну схему                                                                                                                                                                                      |

Крім вищевказаних у центральній частині панелі інструментів розташована комбінована кнопка, призначена для ручного масштабування зображення в активному Схемному Вікні. Число, відображуване в «вікні» кнопки, відповідає кроку вузлів сітки Схемного Вікна в пікселях.

## 2.5. ЛІНІЙКА ТИПОВИХ БЛОКІВ

*Лінійка типових блоків* складається з окремих каталогів (бібліотек), перемикання яких здійснюється однократним кліком лівої клавіші миші у поле «закладки» з відповідною назвою. З огляду, що всі «закладки» не вміщаються по довжині *Лінійки типових блоків*, у правому нижньому куті *Лінійки типових блоків* передбачені спеціальні кнопки,

однократний клік лівою клавішею миші по яких зміщає «закладки» вправо - вліво на одну позицію.

Кожна з бібліотек, включена в *Лінійку типових блоків*, складається з 2...20 блоків. Ті бібліотеки, які не вміщаються в *Лінійку* по довжині, можуть бути «прокручені» вліво - вправо кліками *лівої* клавіші миші по спеціальних кнопках (на початку й кінці *Лінійки*). Для швидкого переміщення в кінець (або початок) каталогу досить однократного кліка *правою* клавішею миші по відповідній кнопці.

## 2.6. КОРОТКИЙ ОПИС ПРОЦЕДУР Й ЕТАПІВ РОБОТИ В ПК МВТУ

У даному підрозділі розглядаються тільки основні процедури роботи, освоєння яких є обов'язковою умовою для самостійної роботи в середовищі програмного комплексу.

Команди й опції виконуються за допомогою меню *Головного Вікна* (див. п. 2.3), або за допомогою командних кнопок (див. п. 2.4).

Формування й редагування структурної схеми САР, введення параметрів блоків, початкових умов, вибір методу й параметрів інтегрування проводяться з використанням як спеціальних графічних процедур, так і за допомогою команд або командних кнопок.

*Структурну схему досліджуваної САР рекомендується попередньо накреслити в тім же виді, у якому ви бажаєте бачити її на екрані монітора.*

Формування структурної схеми і її параметрів, вибір методу, параметрів інтегрування й т.п. доцільно проводити в такій послідовності:

- використовуючи *Лінійку типових блоків*, заповнити Схемне Вікно необхідними блоками приблизно так само, як вони повинні бути розташовані в структурній схемі;
- використовуючи процедури «пересування» блоків, зміни орієнтації блоків й їхніх розмірів, додайте структурній схемі «осмислений» вид;
- використовуючи маніпулятор типу миша, з'єднаєте блоки лініями зв'язку;
- рухаючись ліворуч праворуч і зверху вниз (по блоках у Схемному Вікні), задайте параметри блоків на структурній схемі (коефіцієнти підсилення, постійні часу, початкові умови й т.п.);
- використовуючи кнопку *Параметри розрахунку*, задайте кінцевий час інтегрування, виберіть необхідний метод інтегрування й інші параметри розрахунку;
- збережіть набрану структурну схему (проект) під оригінальним ім'ям на жорсткому диску (наприклад, **proba.prj**);
- запустіть завдання на рахунок, спостерігайте поточні результати в графічних вікнах й аналізуйте їх.

*Увага! Процедуру збереження інформації на жорсткому диску рекомендується виконувати не наприкінці введення всіх умов завдання, а після кожного з перерахованих вище етапів.*

Перший етап – введення структурної схеми (заповнення типовими блоками) можна починати відразу після пуску програмного комплексу в *чисте* Схемне Вікно (створивши його однократним кліком *лівої* клавіші миші по командній кнопці *Новий*).

### **Контрольні питання**

1. У якому виді вводять вихідні дані при моделюванні САР у середовищі ПК «МВТУ»?
2. Яка методика складання структурної схеми моделювання САР?
3. Як задають параметри інтегрування при моделюванні САР за допомогою ПК «МВТУ»?

4. Як розраховують число крапок видачі даних при моделюванні САР у середовищі ПК «МВТУ»?
5. Як можна здійснити пуск ПК «МВТУ»?
6. Яке призначення панелі інструментів?
7. Для чого призначена *Лінійка типових блоків*?
8. Яка послідовність процедур й етапів при роботі із ПК «МВТУ»?

## ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

### РОБОТА 1

#### ВИВЧЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МВТУ НА ПРИКЛАДАХ МОДЕЛЮВАННЯ ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

##### Мети лабораторної роботи:

- вивчити можливості програмного комплексу;
- освоїти процедури формування структурної схеми моделювання, вибору методу й параметрів інтегрування, введення параметрів блоків, виводу даних розрахунку (на прикладі моделювання перехідних процесів типових ланок і ланки загального виду).

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання роботи:** знати поняття структурних схем елементів і САР, типових впливів, перехідних характеристик, типових (елементарних) ланок й їхню класифікацію, а також принципи й методики моделювання САР.

##### Послідовність виконання лабораторної роботи:

- на найпростішому демонстраційному прикладі моделювання типової ланки освоїти й придбати навички самостійної роботи в середовищі ПК «МВТП»;
- по заданому варіанті самостійно підготувати вихідні дані для моделювання типової ланки (таблиця 3.1.1) і ланки загального виду (таблиця 3.1.2) і виконати на комп'ютері всі процедури, необхідні при моделюванні, за аналогією з демонстраційним прикладом.

**Демонстраційний приклад** побудований стосовно до типової коливальної ланки, передаточна функція якого

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2bTp + 1},$$

де  $X(p)$ ,  $Y(p)$  – зображення по Лапласу відповідно вхідної й вихідної величин при нульових початкових умовах;  $k$ ,  $T$ ,  $b$  – відповідно коефіцієнт передачі, постійна часу й коефіцієнт загасання:  $k=1$ ,  $T=1$  с,  $b=0,5$ .

Структурна схема коливальної ланки, що відповідає цієї передаточної функції, показана на рисунку 3.1.1.

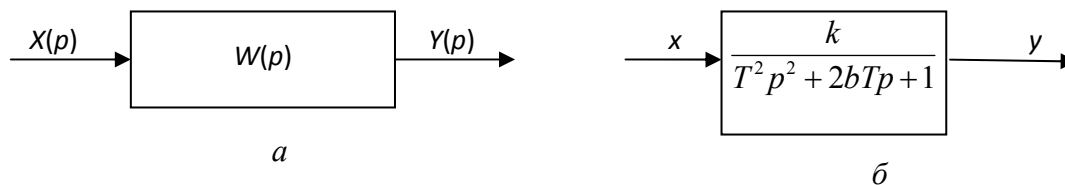
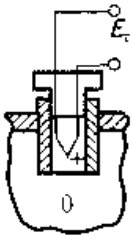
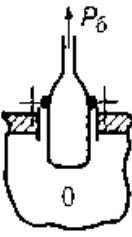
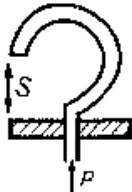
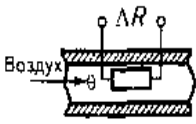
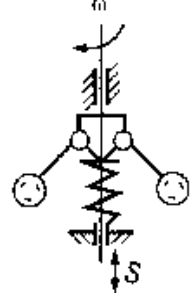
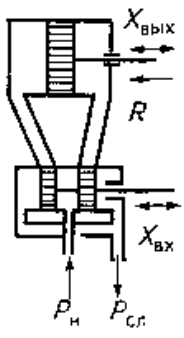
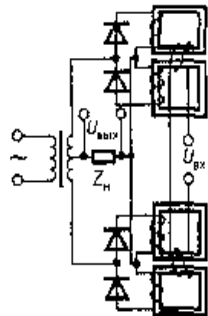
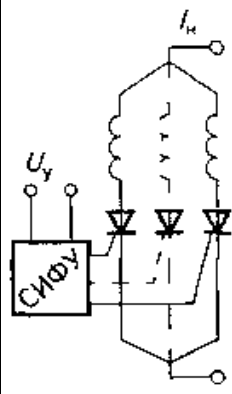
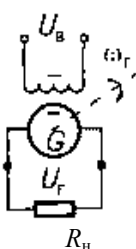


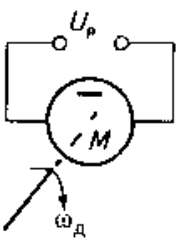
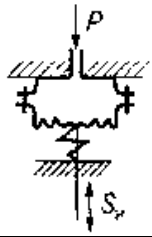
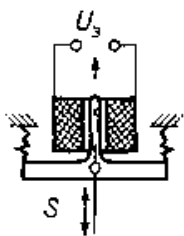
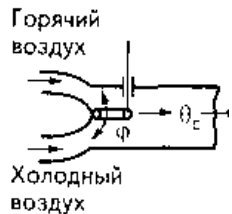
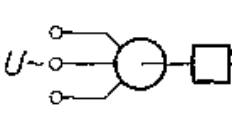
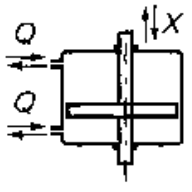
Рисунок 3.1.1. Структурна схема ланки

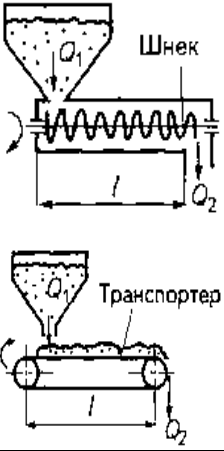
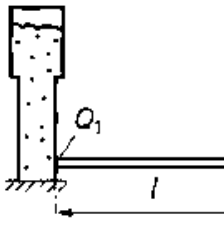
**а** – у загальному виді; **б** – з розкриттям передаточної функції й відображенням вхідної й вихідної величин  $x$  и  $y$

### 3.1.1. Варіанти індивідуальних завдань для моделювання елементів автоматичних систем

| Варіант | Найменування елемента                 | Принципова схема                                                                    | Вхідна величина                       | Вихідна величина                              | Передаточна функція, значення її параметрів                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Термопара, поміщений в захисний кожух |    | Температура об'єкта виміру $\theta$   | ЕДС $E_t$ на зажимах термопари                | $W(p) = \frac{E_t(p)}{\theta(p)} = \frac{k_t}{T_t p + 1},$<br>де $k_t$ – коефіцієнт передачі:<br>$k_t = 0,0005 \dots 0,001 \text{ В/}^\circ\text{C}$ ;<br>$T_t$ – постійна часу термопари:<br>$T_t = 3 \dots 10 \dots 10 \text{ с}$                                                                 |
| 2       | Термобалон                            |    | Температура об'єкта виміру $\theta$   | Тиск $P_6$ у термобалоні                      | $W(p) = \frac{P_6(p)}{\theta(p)} = \frac{k_6}{T_6 p + 1},$<br>де $k_6$ – коефіцієнт передачі:<br>$k_6 = 0,001 \dots 0,01 \text{ Мпа/}^\circ\text{C}$ ; $T_6$ – постійна часу: $T_6 = 0,001 \dots 0,002 \text{ с}$                                                                                   |
| 3       | Трубка Бурдона для виміру тиску       |   | Тиск $P$ у об'єкті виміру             | Переміщення $S$ вільного кінця трубки Бурдона | $W(p) = \frac{S(p)}{P(p)} = \frac{k_t}{T_t p + 1},$<br>де $k_t$ – коефіцієнт передачі:<br>$k_t = 0,5 \dots 1 \dots 1,0 \text{ мм/Мпа}$ ;<br>$T_t$ – постійна часу: $T_t = 0,005 \dots 0,01 \text{ с}$                                                                                               |
| 4       | Термодатчик (термометр опору)         |  | Температура $\theta$ повітря або газу | Зміна опору термодатчика $\Delta R$           | $W(p) = \frac{\Delta R(p)}{\theta(p)} = \frac{k_t}{T p + 1},$<br>де $k_t$ – коефіцієнт передачі:<br>$k_t = 1 \dots 10 \dots 10 \text{ Ом/}^\circ\text{C}$ ; $T$ – постійна часу термодатчика:<br>$T = 3 \dots 10 \dots 10 \text{ с}$                                                                |
| 5       | Тензометричний датчик тиску           |  | Тиск $P_6$                            | Зміна опору тензорезистора $\Delta R$         | $W(p) = \frac{\Delta R(p)}{P_6(p)} = k_t,$<br>де $k_t$ – коефіцієнт передачі:<br>$k_t = 50 \dots 100 \text{ Ом/Мпа}$                                                                                                                                                                                |
| 6       | Відцентровий тахометр                 |  | Частота обертання $\omega$            | Переміщення $S$ тяги тахометра                | $W(p) = \frac{S(p)}{\omega(p)} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\varepsilon T p + 1}$<br>де $k$ – коефіцієнт передачі:<br>$k = 0,05 \dots 0 \dots 0,1 \text{ мс/рад}$ ; $T$ – постійна часу: $T = 0,01 \dots 0 \dots 0,015 \text{ с}$ ; $\varepsilon$ – коефіцієнт загасання:<br>$\varepsilon = 0,1 \dots 0,8$ |

| Варіант | Найменування елемента                                               | Принципова схема                                                                    | Вхідна величина                                                               | Вихідна величина                        | Передаточна функція, значення її параметрів                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7       | Гідропідсилювач                                                     |    | Переміщення золотника $X_{вх}$                                                | Переміщення поршня $X_{вих}$            | <p>1. Для САР з більшою швидкістю</p> $W(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)} = \frac{k}{p(T^2 p^2 + 2\varepsilon T p + 1)},$ <p>де <math>k</math> – коефіцієнт передачі (посилення):<br/> <math>k = 5 \dots 10 \dots 10</math>; <math>T</math> – постійна часу:<br/> <math>T = 0,01</math> с; <math>\varepsilon</math> – коефіцієнт загасання: <math>\varepsilon = 0,2 \dots 0,5</math>.</p> <p>2. Для САР з малою швидкістю</p> $W(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)} = \frac{k}{p}$ <p>при <math>T = 0</math></p> |
| 8       | Магнітний підсилювач                                                |   | Напруга на вході підсилювача $U_{вх}$                                         | Напруга на виході підсилювача $U_{вих}$ | $W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{k_{м.у.}}{T_{м.у.} p + 1},$ <p>де <math>k_{м.у.}</math> – коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача:<br/> <math>k_{м.у.} = 10 \dots 50 \dots 50</math>;<br/> <math>T_{м.у.}</math> – постійна часу обмотки керування магнітного підсилювача:<br/> <math>T_{м.у.} = 0,01 \dots 0,1</math> с</p>                                                                                                                                                                   |
| 9       | Керований тиристорний перетворювач електродвигуна постійного струму |  | Напруга $U_y$ на вході в систему фазового-імпульсно-фазового керування (СіФК) | Сила струму навантаження $I_n$          | <p>1. Для САР з малою швидкістю</p> $W(p) = \frac{I_y(p)}{U_n(p)} = k_n,$ <p>де <math>k_n</math> – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача:<br/> <math>k_n = 5 \dots 10 \dots 10</math> А/В;</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 10      | Генератор постійного струму з незалежним порушенням                 |  | Напруга на обмотці збудження $U_b$                                            | Напруга на затискачах генератора $U_r$  | $W(p) = \frac{U_r(p)}{U_b(p)} = \frac{k_r}{T_r p + 1},$ <p>де <math>k_r</math> – коефіцієнт передачі:<br/> <math>k_r = 2 \dots 5 \dots 5</math>; <math>T_r</math> – постійна часу генератора: <math>T_r = 0,05 \dots 0 \dots 0,8</math>с</p>                                                                                                                                                                                                                                                                     |

| Варіант | Найменування елемента                                   | Принципова схема                                                                    | Вхідна величина                                       | Вихідна величина                                          | Передаточна функція, значення її параметрів                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11      | Електродвигун постійного струму з незалежним порушенням |    | Напруга на затискачах якоря $U_{\text{я}}$            | Частота обертання вала двигуна $\omega_{\text{д}}$        | $W(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{U_{\text{я}}(p)} = \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{е}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p}$ <p>де <math>k_{\text{д}}</math> – коефіцієнт передачі: <math>k_{\text{д}} = 5 \dots 10 \dots 10</math>; <math>T_{\text{е}}</math>, <math>T_{\text{м}}</math> – відповідно електромагнітна й електромеханічна постійні часу: <math>T_{\text{е}} = 0,002 \dots 0,005 \text{с}</math>, <math>T_{\text{м}} = 0,015 \dots 0,02 \text{с}</math></p>                            |
| 12      | Пневматичний виконавчий елемент                         |    | Тиск у мембранній камері $P$                          | Переміщення тяги $S_{\text{п}}$                           | <p>де <math>k_{\text{п}}</math> – коефіцієнт передачі: <math>k_{\text{п}} = 0,5 \dots 1 \dots 1 \text{ мм/МПа}</math>; <math>T_{\text{і}}</math> – постійна часу: <math>T_{\text{і}} = 0,005 \dots 0,01 \text{с}</math>; <math>\varepsilon</math> – коефіцієнт загасання: <math>\varepsilon = 0,1 \dots 0,4</math></p>                                                                                                                                                                               |
| 13      | Електромагніт (електромагнітний виконавчий механізм)    |   | Напруга $U_{\text{е}}$ , подана на електромагніт      | Переміщення якоря електромагніта $S$                      | $W(p) = \frac{S(p)}{U_{\text{е}}(p)} = \frac{k_{\text{е}}}{(T_{\text{е1}} p + 1)(T_{\text{е2}} p + 1)}$ <p>де <math>k_{\text{е}}</math> – коефіцієнт передачі: <math>k_{\text{е}} = 0,05 \dots 0 \dots 0,1 \text{ мм/В}</math>; <math>T_{\text{е1}}</math> – електромагнітна постійна часу електромагніта: <math>T_{\text{е1}} = 0,001 \dots 0,0015 \text{с}</math>; <math>T_{\text{е2}}</math> – механічна постійна часу електромагніта: <math>T_{\text{е2}} = 0,005 \dots 0,01 \text{с}</math></p> |
| 14      | Камера змішування гарячого й холодно-го повітря         |  | Кут повороту заслінки $\phi$                          | Температура повітря в камері змішання $\theta_{\text{с}}$ | $W(p) = \frac{\theta_{\text{с}}(p)}{\phi(p)} = \frac{k_{\text{с}}}{T_{\text{с}} p + 1}$ <p>де <math>k_{\text{с}}</math> – коефіцієнт передачі: <math>k_{\text{с}} = 50 \dots 100^\circ \text{C/рад}</math>; <math>T_{\text{с}}</math> – постійна часу камери змішання: <math>T_{\text{с}} = 0,01 \dots 0 \dots 0,03 \text{с}</math></p>                                                                                                                                                              |
| 15      | Електродвигунний виконавчий механізм                    |  | Напруга на статорній обмотці електродвигуна $U$       | Кут повороту $\phi$ вала редуктора                        | $W(p) = \frac{\phi(p)}{U(p)} = \frac{k_{\text{е}}}{p}$ <p>де <math>k_{\text{е}}</math> – коефіцієнт передачі, що залежить від передаточного числа редуктора: <math>k_{\text{е}} = 2 \dots 8 \dots 8 \text{ рад/В}</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 16      | Поршневий гідравлічний виконавчий механізм              |  | Витрата рідини (масла) $Q$ , подаваної в гідроциліндр | Переміщення штока $X$ гідроциліндра                       | $W(p) = \frac{X(p)}{Q(p)} = \frac{k_{\text{г}}}{p}$ <p>де <math>k_{\text{г}}</math> – коефіцієнт передачі: <math>k_{\text{г}} = 0,003 \dots 0,008 \text{с/см}^2</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| Варіант | Найменування елемента                                 | Принципова схема                                                                   | Вхідна величина                                  | Вихідна величина                                    | Передаточна функція, значення її параметрів                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17      | Шнековий (транспортний) виконавчий механізм-живильник |   | Витрата сипучого матеріалу на вході в шнек $Q_1$ | Витрата сипучого матеріалу на виході зі шнека $Q_2$ | $W(p) = \frac{Q_2(p)}{Q_1(p)} = e^{-p\tau},$ <p>де <math>e</math> – підстава натурального логарифма;<br/> <math>\tau</math> – час запізнювання, з: <math>\tau = l/v</math> (тут <math>l</math> – довжина шнека, транспортера, м; <math>v</math> – швидкість переміщення матеріалу, м/с). Звичайно приймають <math>\tau = 2 \dots 8</math> з</p> |
| 18      | Протяжний водопровід                                  |  | Витрата води з водонапірної башти $Q_1$          | Витрата води на виході з водопроводу $Q_2$          | $W(p) = \frac{Q_2(p)}{Q_1(p)} = e^{-p\tau},$ <p>де <math>e</math> – підстава натурального логарифма;<br/> <math>\tau</math> – час запізнювання, з: <math>\tau = l/v</math> (тут <math>l</math> – довжина водопроводу, м; <math>v</math> – швидкість руху води, м/с). Звичайно <math>\tau = 1 \dots 3</math> з</p>                               |

### 3.1.2. Варіанти індивідуальних завдань для моделювання ланок загального виду

| Варіант | Передатна функція                                                                          | Значення параметрів функції                                                                                                                                                           |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | $W(p) = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$ | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2;$<br>$a_3 = 0,9 \text{ с}^3; a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b_0 = 1;$<br>$b_1 = 3 \text{ с}; b_2 = 0,8 \text{ с}^2; b_3 = 0,3 \text{ с}^3$ |
| 2       | $W(p) = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$                     | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2;$<br>$a_3 = 0,9 \text{ с}^3; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с};$<br>$b_2 = 0,8 \text{ с}^2$                                               |
| 3       | $W(p) = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$                                         | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; b_0 = 1;$<br>$b_1 = 3 \text{ с}$                                                                                                  |
| 4       | $W(p) = \frac{b}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$                               | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2;$<br>$a_3 = 0,9 \text{ с}^3; a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b = 10$                                                                        |
| 5       | $W(p) = \frac{b}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$                                         | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2;$<br>$a_3 = 0,9 \text{ с}^3; b = 10$                                                                                               |
| 6       | $W(p) = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p}$       | $a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3;$<br>$a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с};$<br>$b_2 = 0,8 \text{ с}^2; b_3 = 0,3 \text{ с}^3$          |
| 7       | $W(p) = \frac{T_0 p + 1}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$                               | $T_0 = 2 \text{ с}; T_1 = 4 \text{ с}; T_2 = 1,1 \text{ с};$<br>$T_3 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                 |
| 8       | $W(p) = \frac{T_0 p + 1}{T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + p}$                           | $T_0 = 2 \text{ с}; T_2 = 4 \text{ с}; T_3 = 1,1 \text{ с};$<br>$T_4 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                 |
| 9       | $W(p) = \frac{k}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$                                       | $k = 10; T_1 = 4 \text{ с}; T_2 = 1,1 \text{ с};$<br>$T_3 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                            |
| 10      | $W(p) = \frac{k}{T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + p}$                                   | $k = 10; T_2 = 4 \text{ с}; T_3 = 1,1 \text{ с};$<br>$T_4 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                            |
| 11      | $W(p) = \frac{T_0 p + 1}{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$       | $T_0 = 0,7 \text{ с}; T_1 = 3 \text{ с}; T_2 = 1,2 \text{ с};$<br>$T_3 = 0,9 \text{ с}; T_4 = 0,8 \text{ с}; T_5 = 0,5 \text{ с}$                                                     |
| 12      | $W(p) = \frac{k}{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$               | $k = 10; T_1 = 3 \text{ с}; T_2 = 1,2 \text{ с};$<br>$T_3 = 0,9 \text{ с}; T_4 = 0,8 \text{ с}; T_5 = 0,5 \text{ с}$                                                                  |
|         |                                                                                            |                                                                                                                                                                                       |

Завдання моделювання ланки полягає в одержанні графіка перехідного процесу вихідної величини  $y(t)$  при нульових початкових умовах і східчастому вхідному впливі:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

в одержанні його перехідної функції (кривій розгону).

Вихідні дані для демонстраційного приклада підготовлені у вигляді структурної схеми моделювання (рисунок 3.1.2) і наступних параметрів інтегрування:

максимальний крок інтегрування 0,1 с (на порядок менше постійної часу  $T = 1 \text{ с}$ );

мінімальний крок інтегрування 0,001 с (на один-два порядків менше максимального кроку інтегрування);

час інтегрування 15 с (на один-два порядків більше постійної часу  $T = 1 \text{ с}$ );

точність інтегрування 0,001;  
число точок видачі даних 100 [розраховано по формулі (2.1)].  
Метод інтегрування прийнятий «Адаптивний 1».

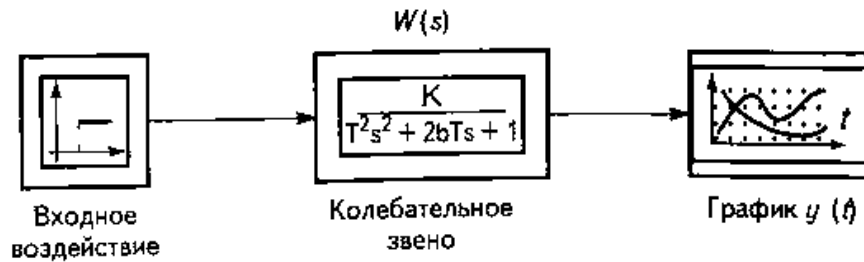


Рисунок 3.1.2. Структурна схема моделювання коливальної ланки зображена з використанням блоків бібліотеки ПК «МВТП»

**Пуск ПК МВТУ, введення структурної схеми й вихідних даних.** Запустити програму, використовуючи рекомендації п. 2.2. введення структурної схеми й вихідних даних відповідно до п. 2.6 виконати послідовно по етапах.

**Етап 1 –заповнення Схемного Вікна необхідними типовими блоками.** Перемістити курсор на кнопку **Новий** і зробити однократний клік *лівою* клавішею миші – відкриється чисте Схемне Вікно. Перемістити курсор на «закладку» **Джерела вхідних впливів** і клацніть один раз *лівою* клавішею миші – ви ініціалізували відповідну бібліотеку типових блоків. Перемістити курсор на блок **Східчастий вплив** (підпис *Сходінка*) і зробити однократний клік *лівою* клавішею миші – фон блоку в *Лінійці* змінився. Це означає, що блок можна «переносити» у Схемне Вікно. Перемістити курсор у верхній лівий кут Схемного Вікна й клацніть один раз *лівою* клавішею миші – у поле Схемного Вікна з'явився стерпний блок. Перемістити курсор на «закладку» **Динамічні ланки**, ініціалізуйте її, перенесіть необхідний блок (*Коливальна ланка*) у Схемне Вікно по вищеописаній процедурі приблизно на бажане місце. Перемістити курсор на «закладку» **Дані**, ініціалізуйте цю бібліотеку типових блоків, перенесіть блок *Часовий графік* у Схемне Вікно приблизно на бажане місце. Нарешті, перемістити курсор на велику кнопку в лівій частині *Лінійки типових блоків* і виконайте однократний клік – ви тимчасово «закрили» всі бібліотеки типових блоків.

У результаті виконання етапу 1 Схемне Вікно прийме вид, показаний на рисунку 3.1.3.

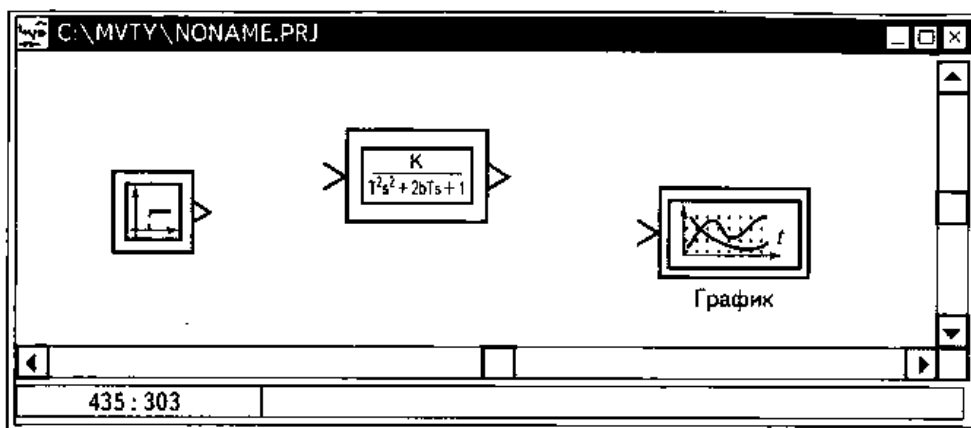


Рисунок 3.1.3. Схемне Вікно, заповнене типовими блоками

**Етап 2 – проведення ліній зв'язку на структурній схемі.** Перемістити курсор на блок *Східчастий вплив*, натисніть на ліву клавішу миші й, не відпускаючи її, «перетягніть» цей блок так, щоб його вихідний порт (іноді називаний просто вихід) по горизонталі був на одному рівні із входним портом (надалі іноді просто вхід) блоку *Коливальна ланка*. Спростити дану процедуру можна, включивши опцію *Сітка* в Схемному Вікні (див. рисунок 2.8). Для цього перемістити курсор на вільне місце в Схемному Вікні й однократно клацніть *правою* клавішею миші – «спливе» *Додаткове командне меню*, у якому необхідно клацнути *лівою* клавішею миші по рядку *Сітка*. У результаті даної операції в Схемному Вікні з'явиться сітка. Після появи сітки необхідно забрати *Додаткове командне меню* кліком *лівої* клавіші миші при розташуванні курсору в будь-якому вільному місці Схемного Вікна.

Далі перемістити курсор на вихідний порт блоку *Східчастий вплив*, клацніть *лівою* клавішею миші і, відпустивши її, «протягніть» горизонтальну лінію зв'язку до входного порту *Коливальної ланки*, де знову клацніть *лівою* клавішею миші – з'явиться типова входна стрілка. Якщо Ви зробили клік *лівою* клавішею раніше, ніж проведений зв'язок ввійшов «у притягання» входного порту, дотягніть лінію зв'язку до відповідного входного порту й клацніть *лівою* клавішею миші.

Виконати аналогічні операції із блоком *Часовий графік*: розташуйте його на одному рівні із блоками *Східчастий вплив* і *Коливальна ланка*. Перемістити курсор на вихід *Коливальної ланки*, клацніть *лівою* клавішею миші і, відпустивши клавішу, «протягніть» горизонтальну лінію до входу блоку *Часовий графік*, де знову клацніть *лівою* клавішею миші.

Якщо в процесі формування структурної схеми виникає необхідність перервати процедуру проведення лінії зв'язку (наприклад, через незадовільний зовнішній вигляд), натисніть клавішу **Shift** і, не відпускаючи її, зробіть клік *лівою* клавішею миші – лінія обірветься. Далі цю лінію можна видалити, виділивши її (клацнувши *лівою* клавішею миші по лінії), і потім видалити лінію за допомогою командної кнопки **Вирізати** (піктограма «ножиці»).

Збережіть уведену частину завдання. Для цього перемістите курсор у **Головному Вікні** на кнопку **Зберегти як...** і зробіть однократний клік *лівою* клавішею миші. У діалоговому вікні, що з'явиться, ініціалізується рядок введення, у якій наберіть оригінальне ім'я вашого завдання, **наприклад proba.prj** (розширення може бути будь-яким, необов'язково **.prj**). Закрийте *Вікно збереження*, клацнувши по кнопці **ОК**.

Після виконання етапу 2 Схемне Вікно прийме вид, показаний на рисунку 3.1.4.

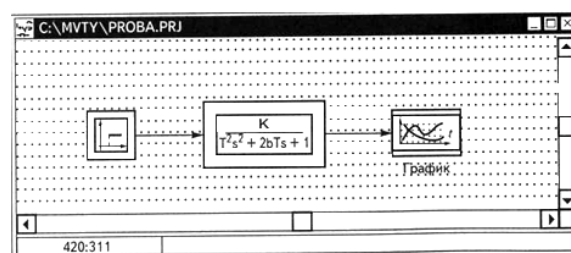


Рисунок 3.1.4. Схемне Вікно з введеною структурною схемою

Сітка в Схемному Вікні для подальшої роботи не потрібна. Її можна видалити, скориставшись *Додатковим командним меню*.

**Етап 3 – введення параметрів структурної схеми.** Перемістити курсор на блок *Вхідний вплив* і зробіть *дворазовий* клік *лівою* клавішею миші – відкриється діалогове вікно

цього блоку. У результаті виконання цих операцій на моніторі повинне з'явитися Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Вхідний вплив* (рисунок 3.1. 5).

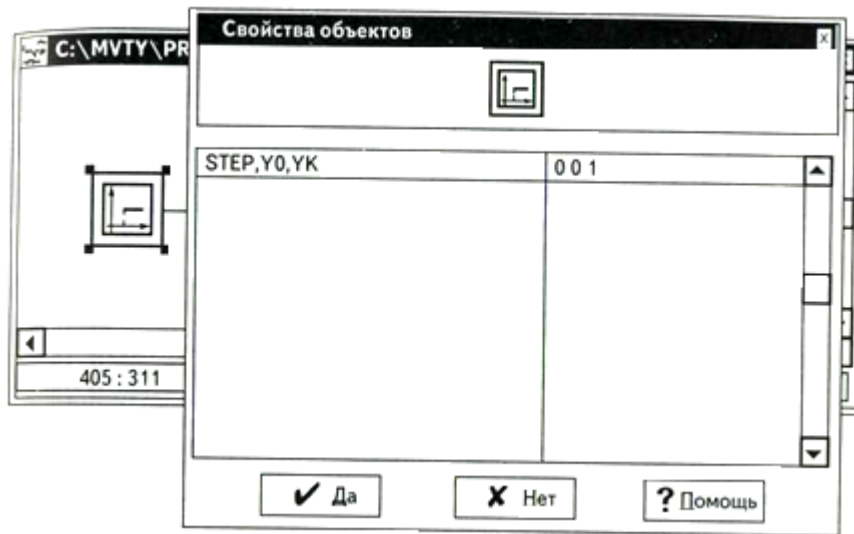


Рисунок 3.1.5. Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Вхідного впливу*

Ініціалізуйте діалоговий рядок, введіть *через пробіл* значення одиничного східчастого впливу 0 0 1 (три числа) і натисніть на кнопку **ОК**. Клацнувши *лівою* клавішею миші по кнопці **Допомога** в діалоговому вікні блоку *Вхідний вплив*, відкриється довідка про правила введення параметрів блоку (рисунок 3.1.6).

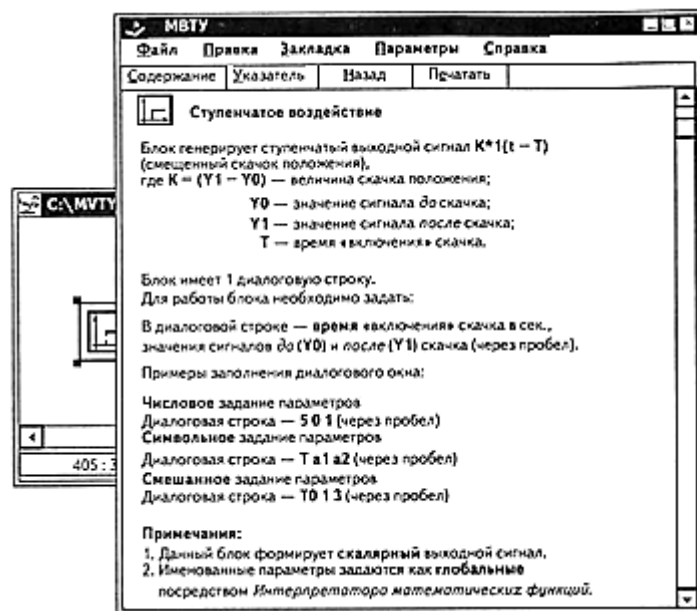


Рисунок 3.1. 6. Довідка про правила введення параметрів блоку *Вхідного впливу*

Аналогічні процедури виконайте для блоку *Коливальна ланка* з  $W(s)$  і введіть відповідні значення  $k$ ,  $T$ ,  $b$  і початкові умов. На рисунку 3.1.7 показано Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Коливальна ланка*, а на рисунку 3.1.8 – довідка про правила введення параметрів блоку.



Рисунок 3.1.7. Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Коливальна ланка*

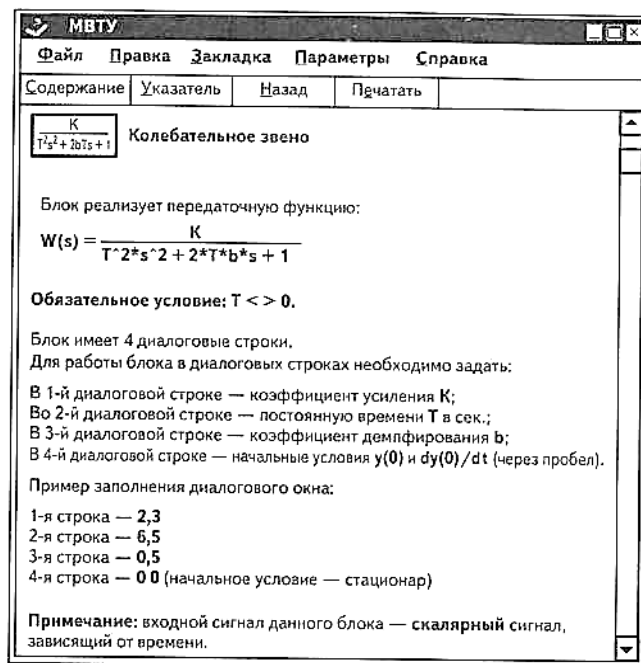


Рисунок 3.1.8. Довідка про правила введення параметрів блоку *Коливальна ланка*

Закрийте діалогове вікно й знову збережіть завдання, клацнувши по командній кнопці **Зберегти**.

**ДОВІДКА.** Діалогове вікно будь-якого типового блоку можна відкрити й іншим способом. Перемістити курсор на блок що редагує, і однократно клацніть *правою* клавішею миші – з'явиться «спливаюче» меню блоку (рисунок 3.1.9). Клік *лівою* клавішею миші по рядку *Властивості* цього меню викличе діалогове вікно блоку.

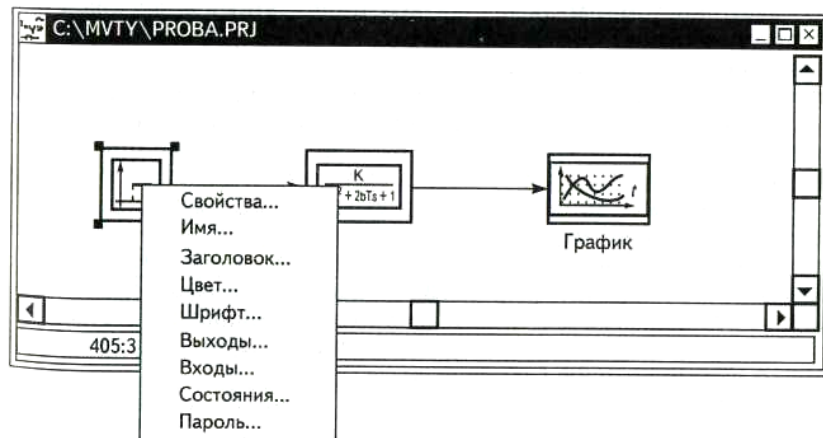


Рисунок 3.1.9. Схемне вікно з «спливаючим» меню блоку

Призначення опцій «спливаючого» меню блоку:

Властивості– для виклику діалогового вікна параметрів блоку;

Ім'я – для присвоєння блоку «унікального» імені;

Заголовок – для зміни підпису під блоком;

Кольори, Шрифт – дублюють аналогічні опції з меню *Стиль*;

Виходи й Входи — для зміни розташування вихідних і вхідних портів блоку;

Стан – у даній версії ПК МВТУ не працює;

Пароль – для «засекречування» параметрів блоку, а для макроблоку – «закриття» небажаного доступу до внутрішньої структури субмоделі.

**Етап 4 – установка параметрів інтегрування.** Перемістити курсор на командну кнопку **Параметри розрахунку** й однократно клацніть лівою клавішею миші – відкриється діалогове вікно для установки параметрів інтегрування. На основі підготовлених вихідних даних виберіть чисельний метод інтегрування «Адаптивний 1». Далі введіть: точність інтегрування 0.001; максимальний крок інтегрування 0.1; мінімальний крок інтегрування 0.001; час інтегрування 15; число точок виводу 100.

Закрийте діалогове вікно, клацнувши лівою клавішею миші по кнопці **ОК**. Збережіть завдання (кнопка **Зберегти**).

**Етап 5 – оформлення пояснюючих підписів.** Виконайте оформлення Схемного Вікна, як показано на рисунку 3.1.3.

Перемістити курсор під блок *Вхідний вплив* і дворазово клацніть лівою клавішею миші – з'явиться тимчасове вікно для введення тексту. Перемістити курсор у це вікно, однократно клацніть лівою клавішею миші і потім введіть заголовок даного блоку (у одній-двох рядках). Перемістити курсор на вільне місце в Схемному Вікні й дворазово клацніть лівою клавішею миші – тимчасове вікно закриється і під блоком з'явиться бажаний підпис. Якщо підпис вийшов з помилками, знову відкрийте тимчасове вікно для введення тексту (дворазовий клік лівою клавішею миші по тексту під блоком) і, використовуючи клавіші редагування (Backspace, Delete й ін.), виправте підпис.

Підпис під блоком можна виконати й іншим способом. Перемістити курсор на редагуємий блок, виконайте однократний клік правою клавішею миші і у «спливаючому» меню блоку яке з'явилося клацніть лівою клавішею миші по рядку *Заголовок*. За допомогою «спливаючого» меню блоку можна редагувати й інші характерні властивості блоку.

Напис над блоком  $W(s)$  виконують за допомогою блоку *Замітка* бібліотеки *Субструктури*.

Інтерфейс ПК МВТУ дозволяє змінити в підписі тип, розмір і кольори шрифту. Ці можливості програмного комплексу через обмеження обсягу в даному практикумі не розглядаються. Відомості по цих можливостях дані в [1].

Виконавши описані вище процедури для всіх блоків, додайте введеної вами структурній схемі вид, подібний до рисунка 3.1.2.

Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

**Етап 6 – відкриття графічного вікна, зміна його розмірів.** Перемістити курсор на блок *Графік  $y(t)$* , однократно клацніть *правою* клавішею миші і в «спливаючому» меню блоку *лівою* клавішею миші виберіть рядок *Властивості*. Перший рядок (*Число входів*) у діалоговому вікні (рисунк. 3.1.10) не вимагає редакції, тому що в ній за замовчуванням введене значення 1. Перемістити курсор на поле введення другого діалогового рядка (*Вивід на кожному кроці*), в якій за замовчуванням введено **Ні**, і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – у поле введення з'явиться спеціальна кнопка. Клацнувши по цій кнопці *лівою* клавішею миші, ви маєте можливість вибору: **Немає** або **Так**.

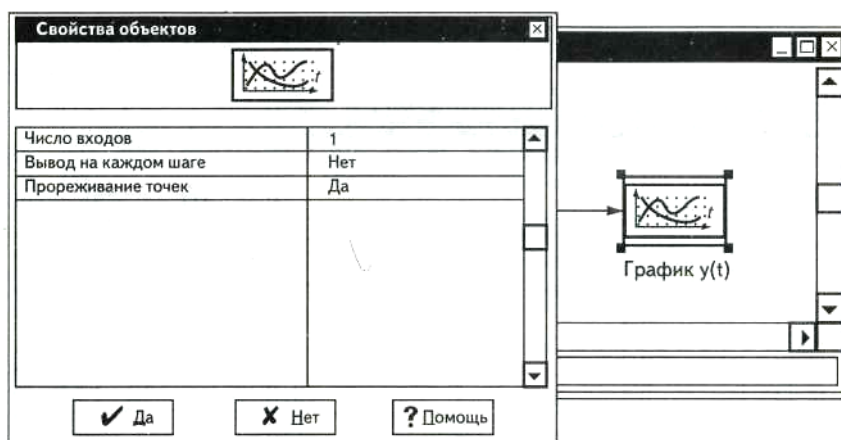


Рисунок 3.1.10. Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Часовий графік*

Якщо ви вибрали **Так**, то при виконанні моделювання в графічному вікні будуть відображатися *всі* зміни лінії графіка *після кожного кроку* інтегрування, а якщо ви вибрали **Ні**, то будуть відображатися зміни лінії графіка через часовий інтервал, рівний приблизно відношенню *Часу інтегрування до Числа точок виводу* (див. діалогове вікно *Параметри розрахунку*).

У третьому рядку діалогового вікна (*Проріджування точок*) за замовчуванням введено **Так**. Якщо необхідно мати інформацію про *всі розрахункові дані*, виведених на графік, то в поле введення третього діалогового рядка варто змінити **Так** на **Немає**.

Помітимо, що в третьому діалоговому рядку введений **Так**, то в обох варіантах заповнення другого діалогового рядка (**Немає** або **Так**) відображувані дані піддаються *проріджуванню* по наступному алгоритмі, якщо три послідовні розрахункові точки лежать на одній прямій (із заданою точністю), то середня точка не відображається на графіку, тому що відрізок, проведений через першу й третю точки, містить і другу точку.

Закрийте діалогове вікно блоку *Часовий графік* (клік по кнопці **ОК**) і дворазово клацніть *лівою* клавішею миші по зображенню цього блоку в Схемному Вікні – відкриється графічне вікно (рисунк. 3.1.11) із заголовком *Графік  $y(t)$* .

Для переносу графічного вікна в інше місце необхідно перемістити курсор на його заголовок, натиснути *ліву* клавішу миші і, не відпускаючи її, «перетягнути» вікно в бажане місце. Розміри вікна змінюють так само, як і будь-яких інших вікон у середовищі Windows. Використовуючи процедуру зміни розмірів, додайте графічному вікну необхідний розмір.

Установку інших параметрів графічного вікна варто виконувати після завершення процесу моделювання перехідних процесів. Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

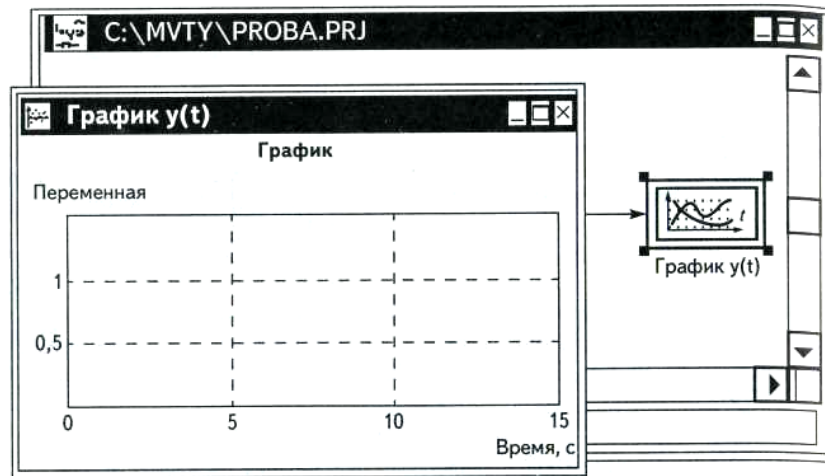


Рисунок 3.1.11. Схемне Вікно із графічним вікном *График y(t)*

**Моделювання перехідних процесів.** Відкрийте графічне вікно дворазовим кліком лівої клавiшi мишi по блоці *Графіку(t)* – це дозволить спостерігати за побудовою графіка в процесі розрахунку. Перемістити курсор на командну кнопку **Продовжити** і клацніть лівою клавiшею мишi – ви запустили створене завдання на рахунок.

По закінченні розрахунку з'явиться спеціальне інформаційне вікно *Виниклі помилки* з повідомленням: «*Попередження: Задана точність не забезпечується*» (рисунок 3.1.12).

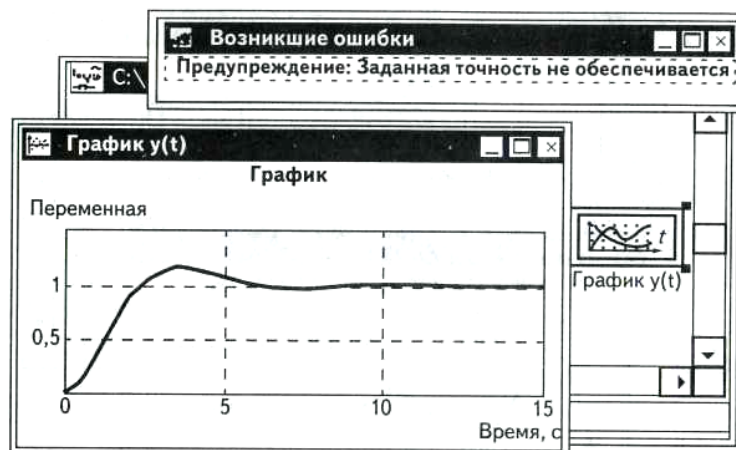


Рисунок 3.1.12. Схемне Вікно із графіком перехідного процесу блоку  
*Коливальна ланка при коефіцієнті демпфірування  $b = 0,5$*

При такому повідомленні перемасштабуйте графічне вікно дворазовим кліком лівої клавiшi мишi по блоці *Графіку(t)*, перемістити курсор на кнопку **Параметри розрахунку**, задайте мінімальний крок інтегрування ( **$1e-10$** ) і повторити процес моделювання. Якщо при різкому зменшенні мінімального кроку інтегрування вид перехідного процесу зовні не змінився, то повідомлення про точність можна проігнорувати, тому що при кроці **0.001** задана точність не забезпечувалася тільки на першому кроці моделювання, тобто при відпрацьовуванні східчастого впливу.

Інтерфейс ПК MBТУ дозволяє редагувати графічне вікно. Для цього перемістити курсор у центральну частину графічного вікна і однократно клацніть *правою* клавiшею миші – з'явиться командне меню графічного вікна. Клацніть *лівою* клавiшею миші по рядку Властивості – відкриється діалогове вікно (рисунок 3.1.13) блоку Часовий графік, що має внизу три «закладки»: *Графіки*, *Вісь X*, *Вісь Y*, причому «закладка» *Графіки* буде активною. За допомогою діалогового вікна можна одержати графік перехідного процесу в бажаному масштабі і оформленні (з використанням кольорів, масштабних сіток і т.д.).



Рисунок 3.1.13. Схемне вікно з діалоговим вікном блоку Часовий графік

Проведіть моделювання перехідного процесу *Коливальної ланки* з коефіцієнтом демпфірування **0,2**, скорегувавши при цьому час інтегрування (рисунок 3.1.14).

Для аналізу отриманих значень процесу в графічному вікні варто викликати таблицю з результатами розрахунків (рисунок 3.1.15). Для цього після моделювання перехідного процесу перемістити курсор у центральну частину графічного вікна й однократно клацніть *правою* клавiшею миші – з'явиться командне меню графічного вікна, у якому однократно клацніть *лівою* клавiшею миші по рядку *Список*. Замість графіка буде показана таблиця з результатами розрахунку перехідного процесу. «Механізм прокручування» дозволяє послідовно переглянути в графічному вікні всю таблицю.

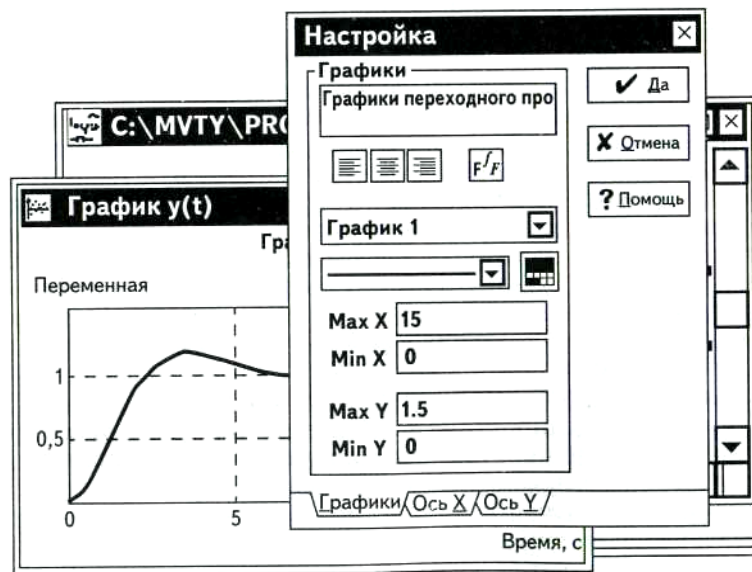


Рисунок 3.1.14. Схемне вікно із графіком перехідного процесу блоку *Коливальна ланка* при коефіцієнті демпфірування  $b = 0,2$

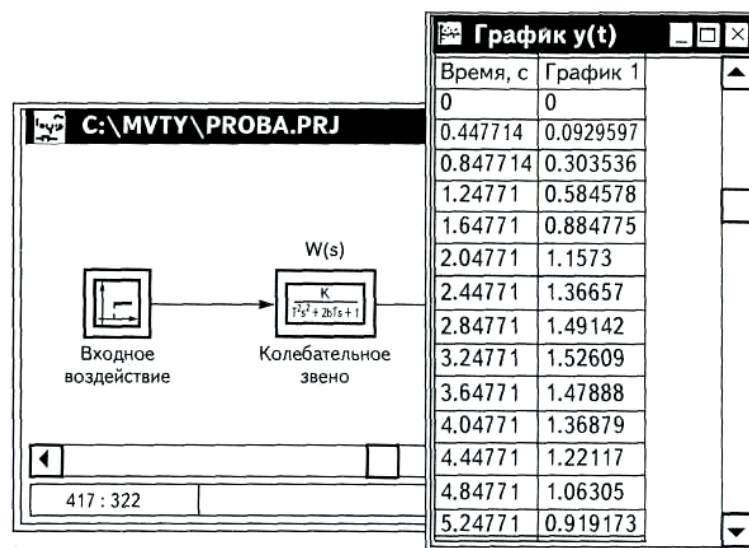


Рисунок 3.1.15. Схемне Вікно з таблицею результатів розрахунку перехідного процесу блоку *Коливальна ланка* при коефіцієнті демпфірування  $b = 0,2$

**Виконання індивідуального завдання.** Для заданих елементів (див. табл. 3.1.1) і типової ланки загального вигляду (див. табл. 3.1.2) підготуйте вихідні дані й змодельуйте перехідний процес при одиничному східчастому входньому впливі в такій послідовності:

- підготуйте креслення структурної схеми моделювання, використовуючи бібліотеку ПК «МВТУ» (додаток А);
- виходячи зі значень параметрів передаточної функції елемента, визначіть параметри інтегрування - метод, точність, крок, час інтегрування й число точок вихідних даних;
- введіть вихідні дані й виконайте моделювання за аналогією з розглянутим демонстраційним прикладом;

- переписіть дані розрахунку з екрана монітора й побудуйте по них графіки перехідних процесів.

**Зміст звіту.** У звіті повинні бути принципові й структурні схеми досліджуваних елементів і ланок, структурні схеми моделювання й графіки перехідних процесів, побудовані за результатами моделювання, а також необхідні висновки по роботі.

### **Контрольні питання**

1. Що таке структурна схема елемента САР?
2. Як створюють структурну схему САР?
3. Які види типових впливів використовують в автоматичі?
4. Що таке перехідна функція (крива розгону)?
5. Що таке типова (елементарна), безінерційна (пропорційна, ідеальна, підсилювальна) ланка?
6. Що являють собою аперіодична ланка першого порядку, аперіодична ланка другого порядку, коливальна ланка, інтегруюча ланка, диференціююча ланка, ланка запізнювання?
7. Що розуміють під термінами «математична модель» й «математичне моделювання»?
8. Яка мета математичного моделювання САР?
9. У чому сутність структурного моделювання САР?
10. У чому сутність комп'ютерного моделювання САР за допомогою ПК МВТУ?
11. Чим відрізняється структурна схема моделювання САР від її вихідної структурної схеми?
12. Як вибирають крок інтегрування?
13. Як вибирають час інтегрування?
14. Як вибирають метод інтегрування?
15. Як обчислюють число точок видачі даних (результатів розрахунку)?

## **РОБОТА 2**

### **ВИВЧЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МВТУ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

#### **Мети роботи:**

- вивчити можливості програмного комплексу;
- освоїти процедури формування структурної схеми моделювання, вибору методу й параметрів інтегрування, введення параметрів блоків, виводу даних розрахунку.

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання роботи.** Крім відомостей, необхідних для виконання лабораторної роботи 1, варто знати принципи роботи САР, поняття їхньої стійкості і якості (п. 1.2. 2), а також методику підготовки даних для моделювання в середовищі ПК МВТУ (п. 2.1).

#### **Послідовність виконання лабораторної роботи:**

- на демонстраційному прикладі моделювання лінійної САР освоїти й придбати навички самостійної роботи в середовищі ПК «МВТУ»;
- для заданої САР (додаток Б) або для САР, розглянутої в демонстраційному прикладі, по варіанті індивідуального завдання (див. табл. 3.2.1) підготувати вихідні дані для моделювання; виконати на комп'ютері всі процедури, необхідні при моделюванні, за аналогією з демонстраційним прикладом; за результатами моделювання проаналізувати стійкість і якість системи відповідно до п. 1.2.2.

Як демонстраційний приклад розглянемо САР завантаження зернодробарки (рисунок 3.2.1).

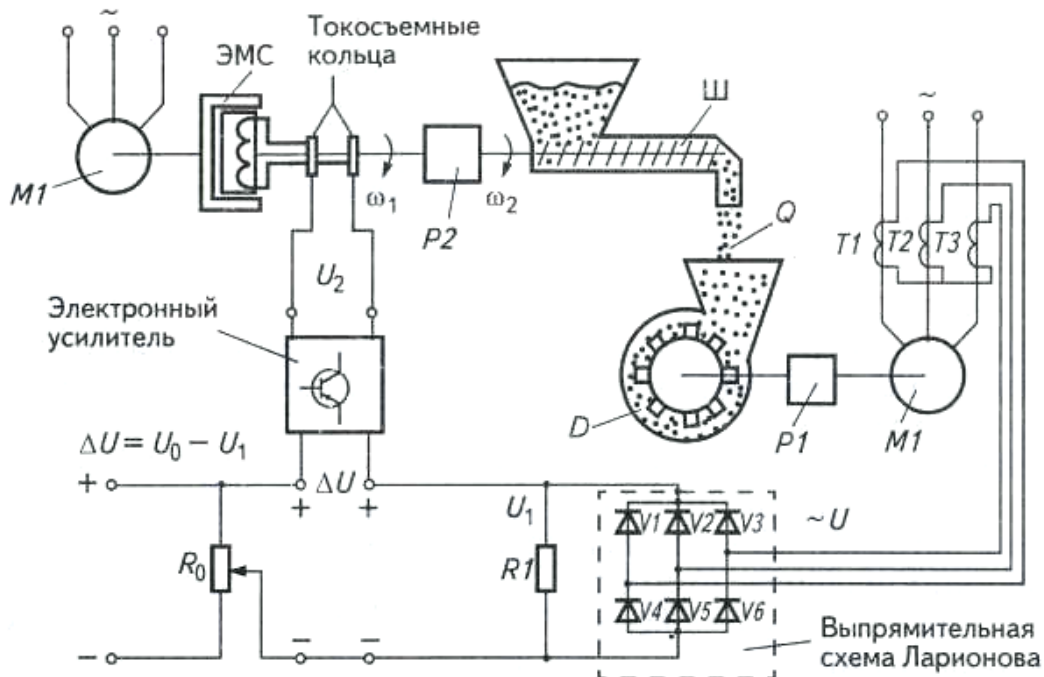


Рисунок 3.2.1. Принципова схема САР завантаження зернодробарки

САР призначена для стабілізації завантаження зернодробарки за допомогою підтримки струму  $I$  приводного асинхронного двигуна  $M1$  у межах його номінального значення.

Об'єктом регулювання в даній системі служить дробарка  $D$  разом з редуктором  $P1$  і приводним електродвигуном  $M1$ . Регульована величина об'єкта – струм двигуна  $I$ , що регулює впливи — кількість зерна  $Q$ , поданого в дробарку. Основними оббурюваннями відхилення струму навантаження електродвигуна, є зміни фізико-механічних властивостей зерна (вологості, твердості, в'язкості, міцності, розмірів форми, засміченості), зношування молотків, асиметрія й зниження напруги й т.п.

Регульована величина — сила струму  $I$  вимірюється трансформаторами  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  і перетворюється за допомогою випрямної схеми Ларіонова в сигнал  $U_1$ , що подається зустрічно задаючій напрузі, – сигналу  $U_0$ . Різниця сигналів  $\Delta U = U_0 - U_1$  надходить на вхід електронного підсилювача, з виходу якого напруга  $U_2$  через струмопровідні кільця подається на обмотку збудження електромагнітної муфти ковзання (ЕМС). Збільшення напруги  $U_2$  приводить до зниження ковзання ЕМС і збільшенню кутової швидкості вихідного вала муфти, а отже, і кутової швидкості шнека  $Ш$ . Зниження напруги  $Ш$  викликає зворотний ефект – зменшує кутову швидкість шнека. Зі зміною швидкості змінюється кількість зерна, що подається в дробарку.

Припустимо, що струм  $I$  став більше номінального. Це приведе до зменшення  $\Delta U$ , а отже, і кутової швидкості  $\omega_2$  вала шнека, і кількості зерна  $Q$ . Зниження подачі зерна в дробарку забезпечує зниження струму електродвигуна до номінального значення.

Зменшення струму навантаження приведе до росту неузгодженості  $\Delta U = U_0 - U_1$ , збільшенню подачі зерна  $Q$ , і відповідно до росту струму навантаження до номінального значення.

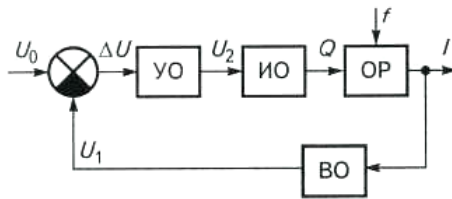


Рисунок 3.2.2. Функціональна схема САР завантаження зернодробарки:

ОП – об'єкт регулювання ( $MI, D, PI$ ); ВО – виконавчий орган ( $ЕМС, PI, III$ );  
В – сприймаючий орган ( $T1, T2, T3; VI...V6$ );  $f$  – узагальнений обурюючий вплив,  
на об'єкт регулювання

Функціональна схема САР показана на рисунку 3.2. 2, а структурна її схема – на рисунку 3.2. 3. При моделюванні САР як збурюючого вплива будемо розглядати один з факторів - відхилення напруги живильної мережі  $\Delta U_c$ .

Передаточні функції елементів САР мають такий вигляд:

$$W_{01}(p) = \frac{k_{01}}{T_0 p + 1} \quad - \text{об'єкт регулювання по регулюючих впливах};$$

$$W_{02}(p) = \frac{k_{02}}{T_0 p + 1} \quad - \text{об'єкт регулювання по обурюючих впливах};$$

$$W_p(p) = k_p \quad - \text{редуктор};$$

$$W_{ш}(p) = k_{ш} e^{-p\tau} \quad - \text{шнек};$$

$$W_e(p) = \frac{k_e}{T_e p + 1} \quad - \text{ЕМС};$$

$$W_y(p) = k_y \quad - \text{підсилювач};$$

$$W_T(p) = k_T \quad - \text{трансформатори струму й випрямляч}.$$

Параметри передаточних функцій мають наступний фізичний зміст:

$k_{01}, k_{02}, k_p, k_{ш}, k_e, k_y, k_T$  – коефіцієнти передачі відповідних елементів системи;

$T_0, T_e$  – постійні часу відповідних елементів системи;

$\tau$  – запізнювання, обумовлене транспортним запізнюванням потоку зерна в шнеку й у приймальному пристрої дробарки.

Значення параметрів передаточних функцій:

$k_{01} = 125 \text{ A} \cdot \text{с/кг}$ ;  $T_0 = 1,2 \text{ с}$ ;  $k_{02} = 0,33 \text{ A/B}$ ;  $k_p = 0,33$ ;  $k_{ш} = 0,042 \text{ кг/рад}$ ;  $\tau = 0,4 \text{ с}$ ;  $k_e = 3,17 \text{ рад/(B} \cdot \text{с)}$ ;  $T_e = 0,4 \text{ з}$ ;  $k_y = 1...5$ ;  $k_T = 0,2 \text{ В/А}$ .

Номінальний струм  $I_n = 62 \text{ А}$ .

Східчастий обурюючий вплив  $\Delta U_c = 70 \text{ В}$  надходить через 10 с після початку розрахунку.

Вхідні дані, необхідні для моделювання САР, підготуємо з урахуванням рекомендацій, наведених у п. 2.1 (етап 1), і додатка А. На їхніх основах складемо структурну схему моделювання САР за допомогою заміни кожної ланки вихідної структурної схеми (див. рисунок 3.2.3) еквівалентним блоком із ЗАГАЛЬТЕХНІЧНОЇ бібліотеки ПК «МВТП».

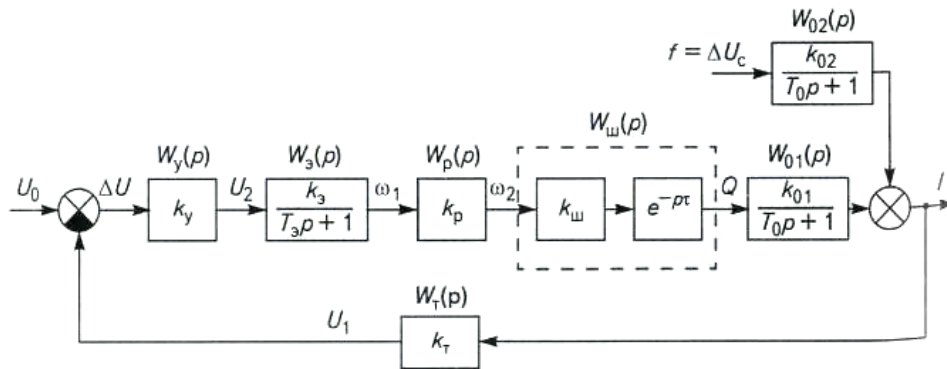


Рисунок 3.2.3. Структурна схема САР завантаження зернодробарки

Для формування задаючого впливу,  $U_0$  використаємо блок *Константа*, а обурюючого впливу  $\Delta U_c$  – блок *Східчастий вплив* з розділу бібліотеки *Джерела входних сигналів*. З розділів *Дані* для реєстрації перехідних процесів на виході САР виберемо блок *Часовий графік*. З'єднавши обрані блоки відповідно до вихідної структурної схеми, одержимо структурну схему для моделювання САР (рисунок 3.2.4). Для визначення вихідних числових даних, які необхідно задавати при моделюванні САР, скористаємося п. 2.1 (етап 2):

- метод інтегрування прийнемо «Адаптивний 1»;
- точність інтегрування задамо 0,001;
- максимальний крок інтегрування визначимо на основі аналізу постійних часу ( $T_0 = 1,2$  с;  $\tau = 0,4$  с;  $T_e = 0,4$  с). Мінімальні значення мають ті  $T_e$ , тому максимальний крок інтегрування прийнемо рівним 0,04 с (у десять разів менше цих значень);
- мінімальний крок інтегрування задамо в 100 разів менше його максимального значення, тобто рівним 0,0004 с;
- час інтегрування з обліком максимальної постійної часу об'єкта регулювання  $T_0$  прийнемо в 10 разів більше, тобто рівним 12 с;
- число точок видачі даних розрахуємо по формулі (2.1):

$$n = \frac{12}{2 \cdot 0,04} = 150.$$

**Введення структурної схеми й вихідних даних.** Введення структурної схеми (див. рисунок 3.2.4) і підготовлених числових даних у комп'ютер виконується після пуску програмного комплексу (див. п. 2.2) поетапно (див. п. 2.6).

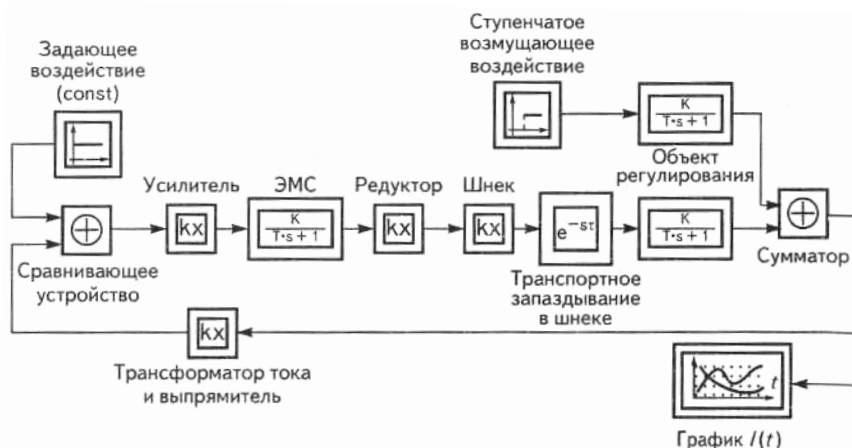


Рисунок 3.2.4. Структурна схема моделювання САР

**Етап 1 – заповнення Схемного Вікна необхідними типовими блоками.** Перемістити курсор на кнопку **Новий** й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється чисте Схемне Вікно. Перемістити курсор на «закладку» **Джерела вхідних впливів** однократно клацніть *лівою* клавішею миші – ви ініціалізували відповідну бібліотеку типових блоків. Перемістити курсор на блок **Константа** (підпис *Константа*) і зробіть однократний клік *лівою* клавішею миші: фон блоку в *Лінійці типових блоків* змінився. Це означає, що блок можна «переносити» у Схемне Вікно. Перемістити курсор у верхній лівий кут Схемного Вікна й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – у поле Схемного Вікна з'явився стерпний блок. Повторіть вищеописані дії й перенесіть блок *Східчастий вплив* (підпис *Сходінка*). Перемістити курсор на «закладку» **Операції математичні** й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – ви ініціалізували відповідну типову бібліотеку. Перемістити курсор на блок **Суматор** і зробіть однократний клік *лівою* клавішею – фон блоку змінився. Перемістити курсор у поле Схемного Вікна на місце, де ви бажали б розташувати порівнюючий *пристрій* і однократно клацніть *лівою* клавішею миші - перенос блоку Суматор у Схемне Вікно виконаний. Повторіть вищеописані дії для переносу на вільне місце в Схемному Вікні другого блоку **Суматор**, необхідного для підсумовування вихідних сигналів Об'єкта регулювання. У такий же спосіб перенесіть чотири блоки **Підсилювач**. Перемістити курсор на «закладку» **Динамічні ланки**, ініціалізували її, перенесіть три блоки *Аперіодичні ланки* в Схемне Вікно по вищеописаній процедурі приблизно на бажані місця. З бібліотеки **Нелінійні ланки** перенесіть блок *Ідеальна запізніла ланка*. Перемістити курсор на «закладку» **Дані**, ініціалізували цю бібліотеку типових блоків, перенесіть блок **Часовий графік** у Схемне Вікно на бажане місце. Нарешті, перемістити курсор на велику кнопку в лівій частині **Лінійки типових блоків** і зробіть однократний клік – ви тимчасово «закрили» всі бібліотеки типових блоків.

**Етап 2 – проведення ліній зв'язку на структурній схемі** (рисунок 3.2. 5). Додайте необхідну орієнтацію блоку **Константа** (у структурній схемі моделювання це блок задаючий *вплив*) по розташуванню вихідного порту (на структурній схемі САР блок орієнтований праворуч ліворуч із метою раціонального використання робочої площі Схемного Вікна). Орієнтація блоків може бути кожна – це не має принципового значення. Для повороту портів блоку на кут  $90^\circ$  проти ходу годинної стрілки натисніть на клавіатурі клавішу **Shift**, не відпускаючи її, зробіть клік *лівою* клавішею миші по блоці. Повторіть цю процедуру ще один раз - орієнтація блоку стане праворуч ліворуч і т. д.

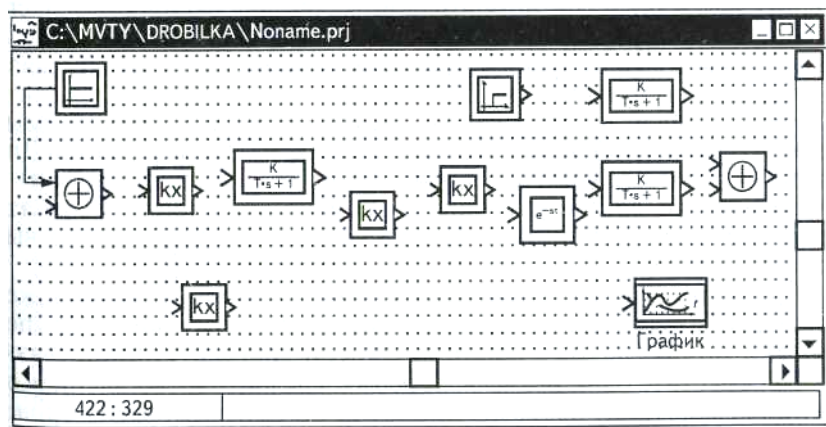


Рисунок 3.2.5. Схемне Вікно, заповнене типовими блоками

Встановіть курсор на блок **Суматор** (у структурній схемі моделювання порівнюючий *пристрій*), натисніть на ліву клавішу миші і не відпускаючи її «перетягніть» цей блок так, щоб було зручно з'єднати його верхній вхідний порт (надалі просто вхід) з

вихідним портом блоку *Константа*. Спростити процедуру проведення ліній зв'язку можна, включивши опцію *Сітка* в Схемному Вікні. Для цього перемістити курсор на вільне місце в Схемному Вікні й однократно клацніть *правою* клавішею миші – «спливе» *Додаткове командне меню*, у якому необхідно клацнути *лівою* клавішею миші по рядку *Сітка*. Далі перемістити курсор на вихідний порт блоку задаючий *вплив*, клацніть *лівою* клавішею миші і, відпустивши клавішу, простягніть із необхідними поворотами лінію *зв'язку* до верхнього вхідного *порту порівнюючого пристрою*. Якщо потрібно зробити поворот у проведеній лінії зв'язку, як на рисунку 3.2.5, то варто клацнути *лівою* клавішею миші і продовжувати вести лінію зв'язку в новому напрямку. У цьому випадку потрібно провести лінію зв'язку від вихідного порту блоку задаючого *вплива* праворуч. Проведіть у ліво від вихідного порту блоку задаючого *вплива* горизонтальну лінію зв'язку на необхідну відстань до точки повороту, у якій *клацніть* *лівою* клавішею миші, і продовжуйте вести вертикальну лінію зв'язку вниз, потім у наступній точці повороту лінії зв'язку ще раз *клацніть* *лівою* клавішею миші і продовжуйте лінію горизонтально вправо до верхнього вхідного порту *блоку порівнюючого пристрою*. Знову однократно клацніть *лівою* клавішею – на верхньому вході з'явиться типова вхідна стрілка. Якщо ви зробили клік *лівою* клавішею раніше, ніж проведений зв'язок ввійшов «у притягання» вхідного порту, дотягніть лінію зв'язку до відповідного вхідного порту й зробіть клік *лівою* клавішею миші.

Якщо ви бажаєте перервати процедуру проведення лінії зв'язку (наприклад, через зовнішній вигляд – «некрасива»), натисніть клавішу **Shift i** не відпускаючи її, клацніть *лівою* клавішею миші – лінія обірветься. Далі цю лінію можна видалити. Для цього виділити її (клік *лівою* клавішею миші по лінії) і потім видалити лінію за допомогою командної кнопки **Вирізати** (піктограма «ножиці»). Так само видаляють попередньо виділені блоки.

С використанням аналогічних процедур уточніть розташування блоків у ланцюзі структурної схеми, використовуючи процедуру «перетаскування» блоків у Схемному Вікні, і проведіть лінії зв'язку. Перемістити блок *Часовий графік*, зробіть «відгалуження» від лінії зв'язку між блоками *Суматор* і *Підсилювач* (ланка *Трансформатор струму й випрямляч*), продовжіть «відгалуження» від лінії зв'язку до входу в блок *Часовий графік* (рисунок 3.2.4). Для цього перемістити курсор на лінію зв'язку, натисніть на клавішу **Ctrl i** не відпускаючи її, клацніть *лівою* клавішею миші – на лінії зв'язку з'явиться темна точка. Відпустивши обидві клавіші, проведіть лінію зв'язку до входу блоку *Часовий графік* і клацніть *лівою* клавішею миші.

Відключіть опцію *Сітка* в Схемному Вікні.

Збережіть введену частину завдання. Для цього перемістити курсор у **Головному Вікні** на кнопку **Зберегти як...** і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – у діалоговому вікні, що з'явилося, ініціалізовався рядок введення. Наберіть у ній оригінальне ім'я вашого завдання, наприклад **drobilka.prg** (розширення може бути іншим, необов'язково **prj**). Закрийте Вікно збереження, клацнувши по кнопці **ОК**.

На рисунку 3.2.6 показане Схемне Вікно з введеною структурною схемою САР.

Перемістити курсор на лівий нижній кут окантовки Схемного Вікна – з'явиться спеціальна *похила* двостороння стрілка типу  $\Leftrightarrow$ . Встановіть необхідний розмір Схемного Вікна. Якщо набрана структурна схема не «вписалася» у розміри Схемного Вікна, перемістити курсор на командну кнопку **Побачити всю схему** й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відбудеться перемасштабування структурної схеми, і вона стане спостережуваною в Схемному Вікні повністю.

Знову збережіть завдання, клацнувши *лівою* клавішею миші по кнопці **Зберегти**.

**Етап 3 – введення параметрів структурної схеми.** Розглянемо введення параметрів структурної схеми на прикладі блоку *Східчастий обурюючий вплив*.

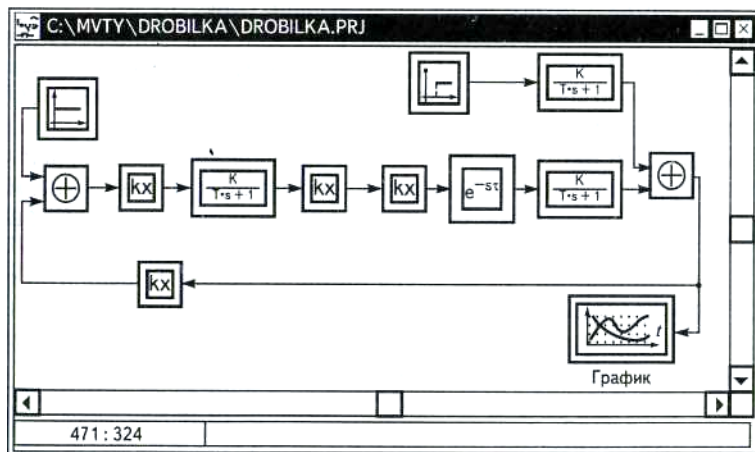


Рисунок 3.2.6. Схемне Вікно з введеною структурною схемою САР

Перемістити курсор на блок *Східчастий обурюючий вплив*, і дворазово клацніть лівою клавішею миші – відкриється діалогове вікно цього блоку (рисунок 3.2.7). ініціалізуйте діалоговий рядок, введіть *через пробіл* 10 0 70 (три числа) і натисніть на кнопку **ОК**. Це означає, що східчастий обурюючий вплив, 70 В буде поданий через 10 с після початку розрахунку. До цього збурювання було відсутнє (0 – нульові початкові умови).

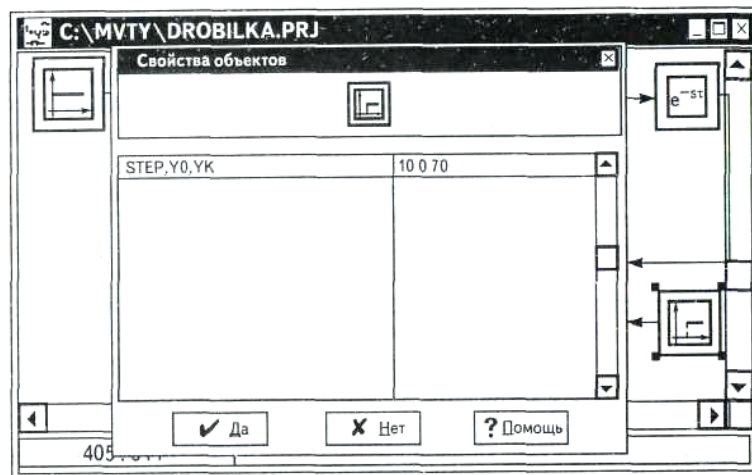


Рисунок 3.2.7. Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Східчастий вплив*

Для одержання довідки про правила введення параметрів блоку клацніть лівою клавішею миші по кнопці **Допомога** в діалоговому вікні блоку *Східчастий вплив* (рисунок 3.2.8).

Проведіть аналогічні процедури з кожним блоком і введіть їхні параметри. На рисунках 3.2.9...3.2.12 показані діалогові вікна з введеними параметрами блоків структурної схеми, зображеної на рисунку 3.2.6

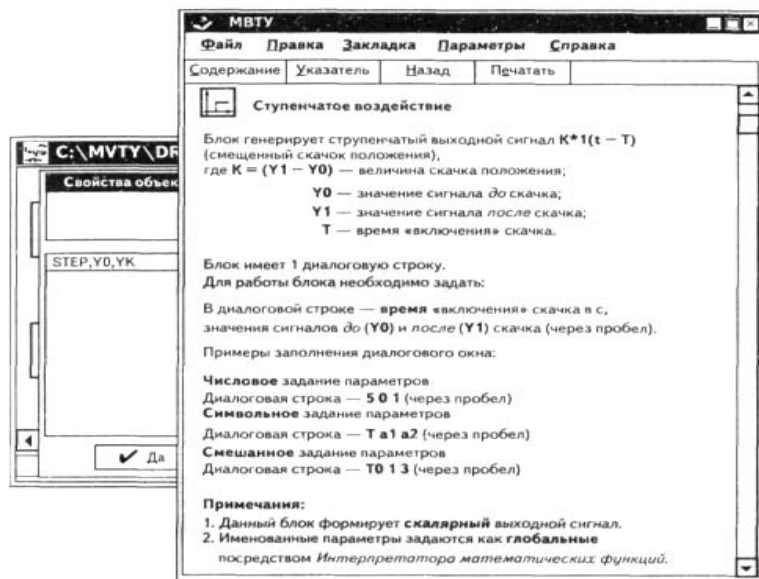


Рисунок 3.2.8. Довідка про правила введення параметрів блоку *Східчастий вплив*

Відкрийте діалогове вікно блоку порівнюючий *пристрій* у якому рівняються задаючий вплив і сигнал *Головного зворотного зв'язку* САР. Переконайтесь, що в діалоговому рядку вже введені (за замовчуванням) необхідні параметри: +1 і -1 (через пробіл). Для орієнтації блоку ліворуч праворуч *Головний зворотний зв'язок* варто подати на нижній вхід, якщо параметри блоку введені за замовчуванням (+1 і -1). Це необхідно для створення *негативного Головного зворотного зв'язку* САР.

В діалоговому вікні блоку *Суматор*, у якому повинні бути просумовані без зміни знаків вихідні сигнали блоку *Об'єкт регулювання* (від регулюючого й збурюючого впливів), необхідно ввести (через пробіл) параметри: +1 і +1. Це треба обов'язково зробити, тому що параметри суматора за замовчуванням +1 і -1.

Снову збережіть завдання, клацнувши по командній кнопці **Зберегти**.

**ДОВІДКА.** Якщо *Суматор* використовують для алгебраїчного додавання трьох сигналів, наприклад з ваговими коефіцієнтами **0.8**, **-1.2** і **2.5**, то в рядку введення необхідно ввести відповідні параметри через пробіл: **0.8 -1.2 2.5**. При закритті діалогового вікна блоку відбудеться «перемальовування» цього блоку і він буде мати три вхідних порти: верхній (при орієнтації блоку *ліворуч праворуч*) — для першого сигналу (коефіцієнт **0.8**), середній — для другого (коефіцієнт **-1.2**), нижній — для третього сигналу (коефіцієнт **2.5**). Аналогічно надходять при більшому числі сумованих сигналів.

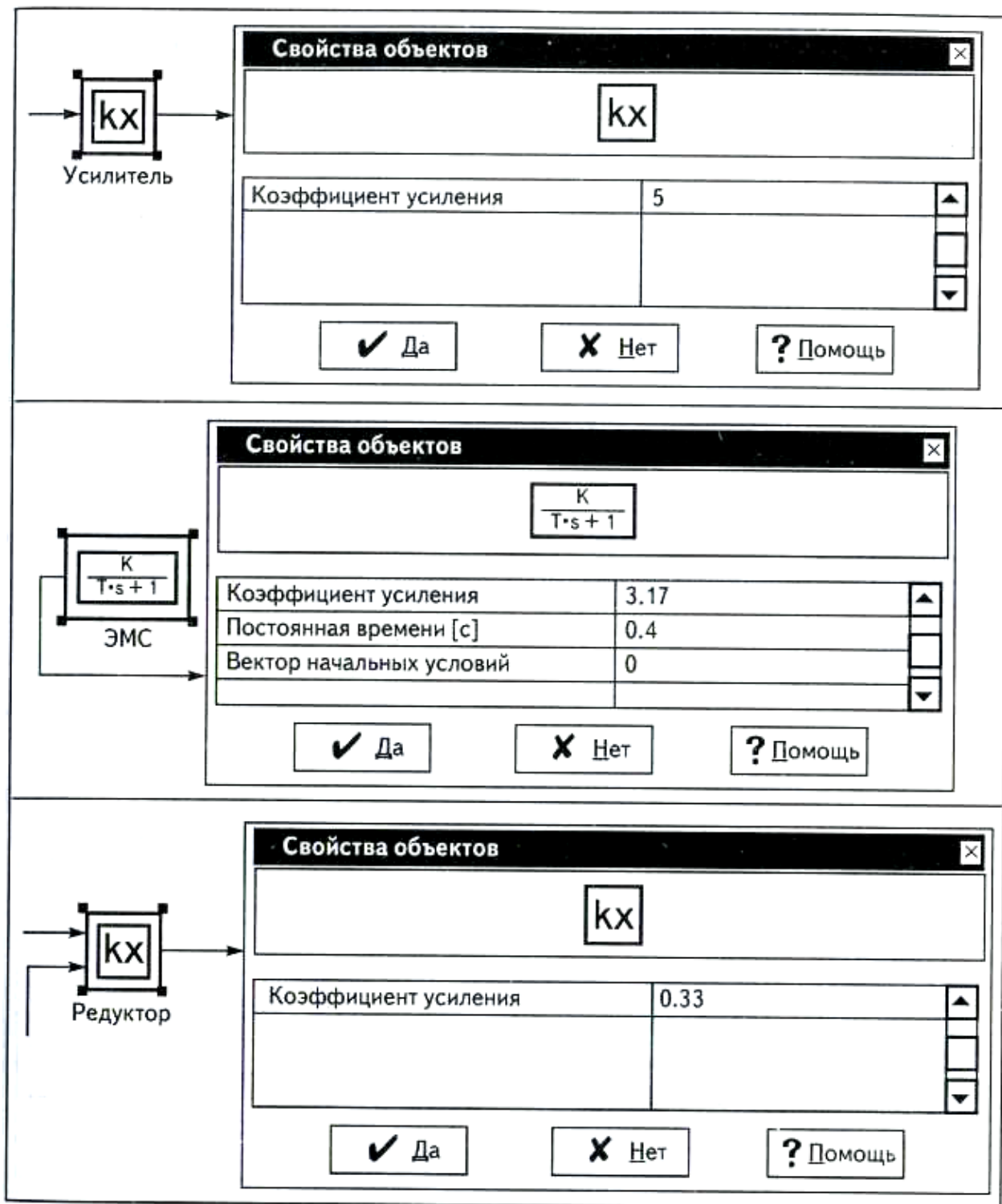


Рисунок 3.2. 9. Діалогові вікна із заданими параметрами блоків *Східчастий збурюючий вплив, задаючий вплив, порівнюючий пристрій* (див. Рисунок 3.2.6)

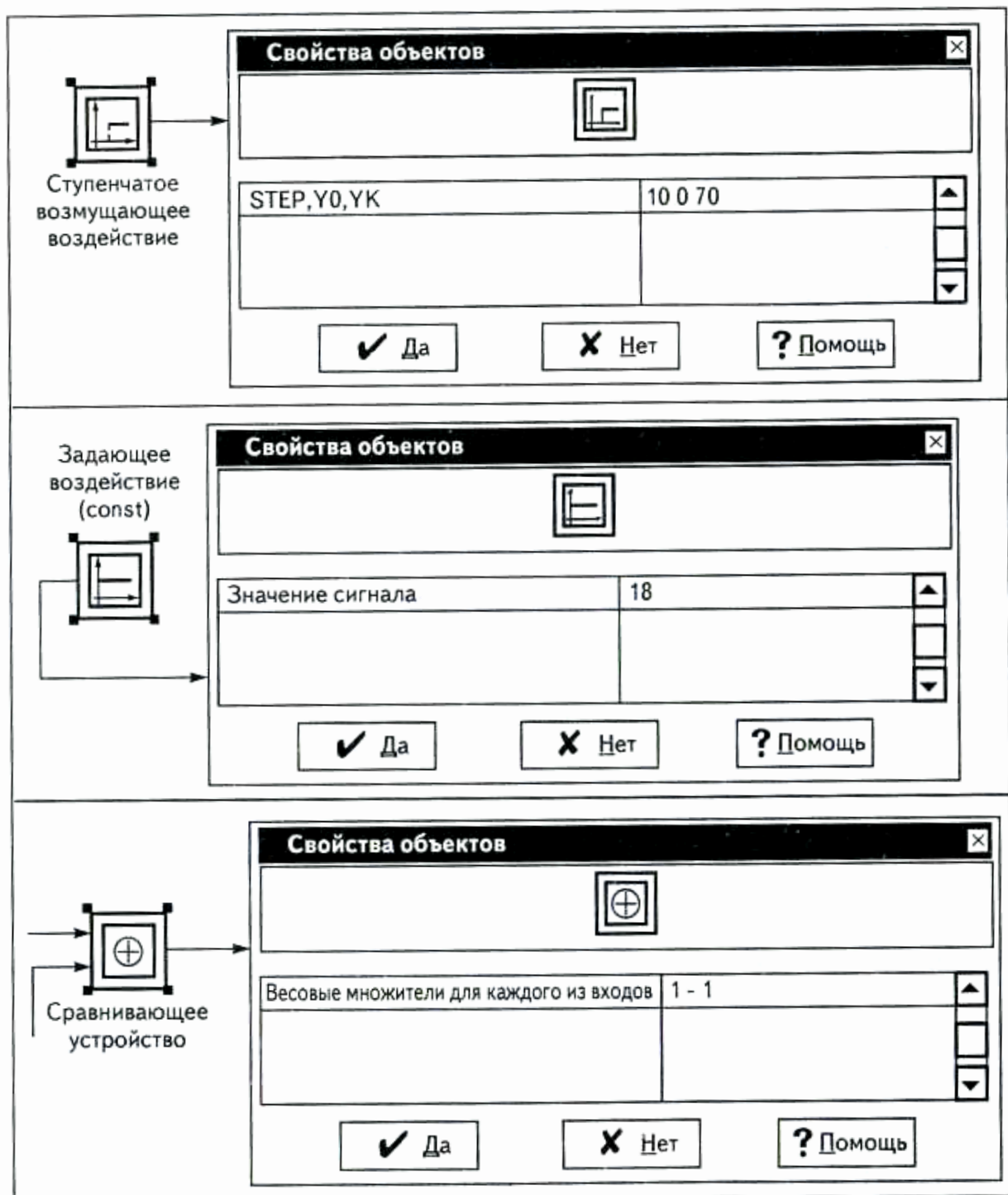


Рисунок 3.2.10. Діалогові вікна із заданими параметрами блоків Підсилювач, ЕМС, Редуктор (див. рисунок 3.2.6)

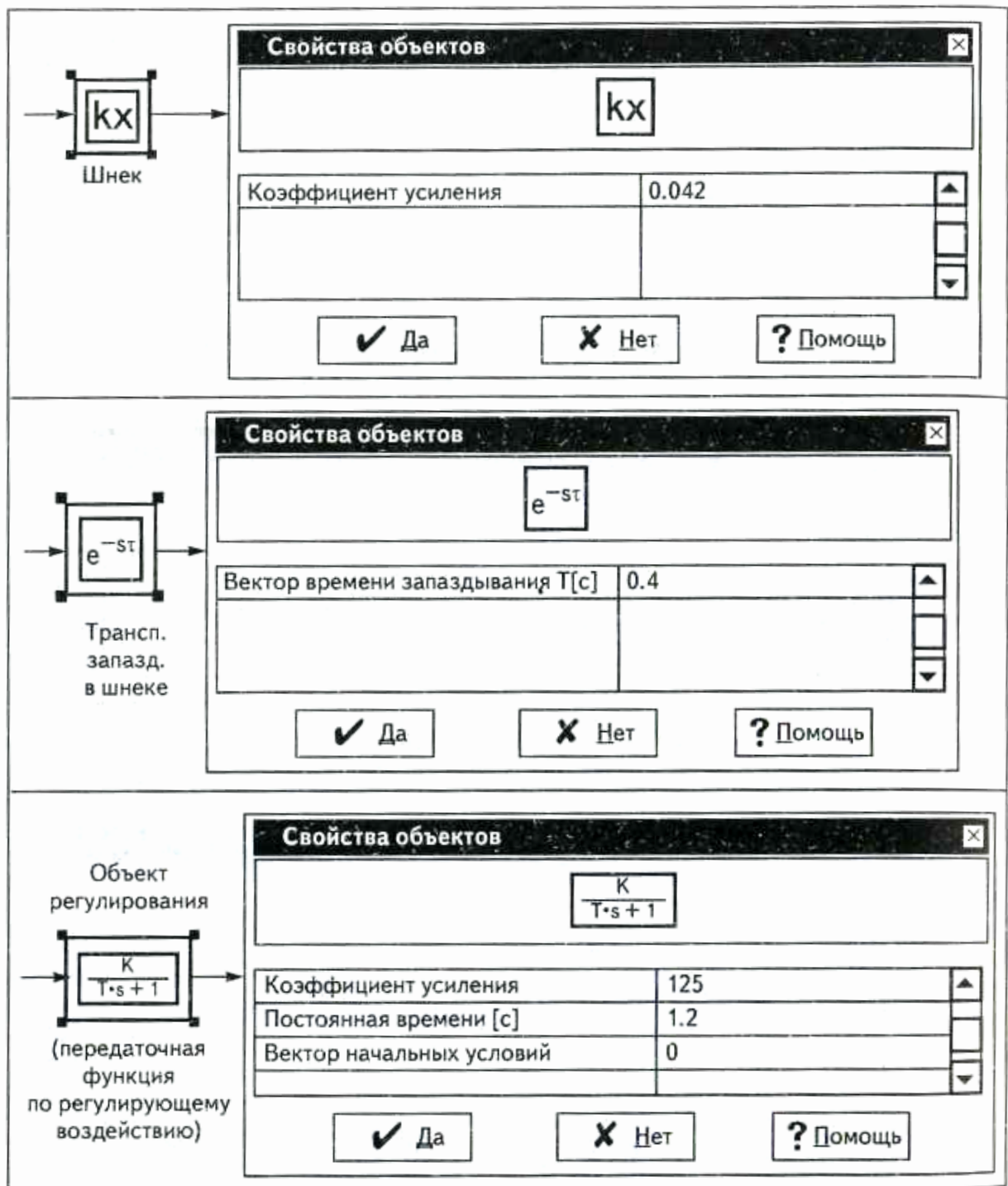


Рисунок 3.2.11. Діалогові вікна із заданими параметрами блоків Шнек, Транспортне запізнювання в шнеку, Об'єкт регулювання (Рисунок 3.2.6)

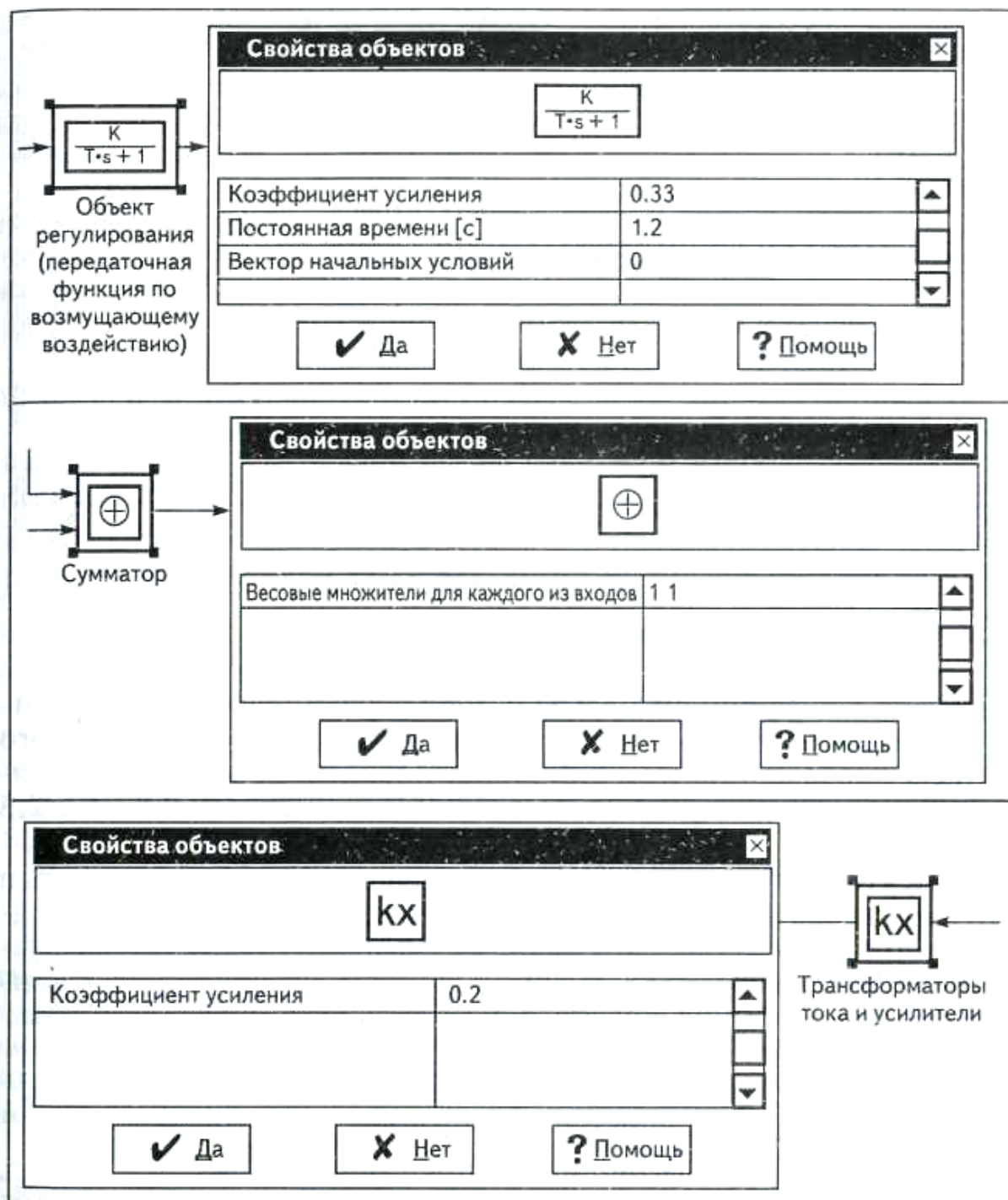


Рисунок 3.2.12. Діалогові вікна із заданими параметрами блоків *Об'єкт регулювання*, *Суматор*, *Трансформатори струму й випрямлячі* (рисунок 3.2.6)

Зміна орієнтації блоку приводить до відповідної зміни положення вхідних портів. Так, при орієнтації *знизу нагору* колишній верхній вхідний порт (для першого сигналу з коефіцієнтом 0.8) стане першим ліворуч; при орієнтації *праворуч ліворуч* колишній верхній вхідний порт (для першого сигналу з коефіцієнтом 0.8) стане нижнім. У всіх випадках запис у діалоговому рядку блоку залишається незмінним: 0.8 -1.2 2.5 (через пробіл).

Діалогове вікно будь-якого типового блоку можна відкрити й іншим способом. Перемістити курсор на блок що редагує і однократно клацніть *правою* клавiшею миші – з'явиться «спливаюче» меню блоку (рисунок 3.2.13), у якому, клацнувши *лівою* клавiшею миші по опції *Властивості*, можна викликати діалогове вікно.

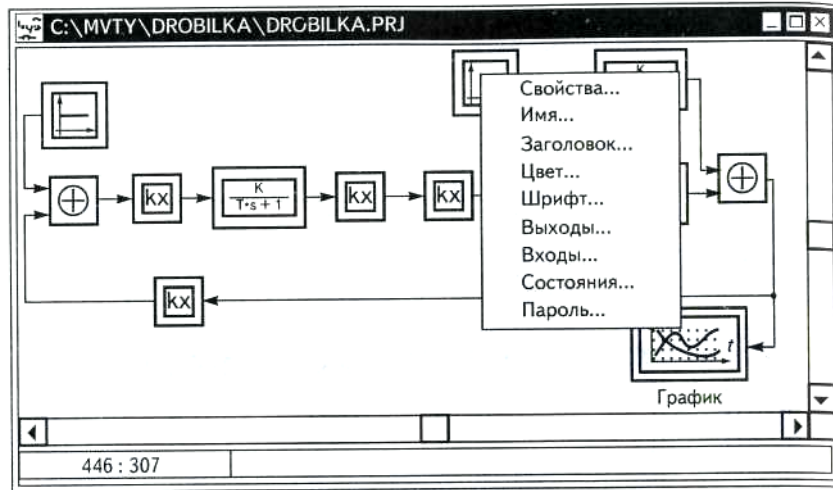


Рисунок 3.2.13. Схемне Вікно з «спливаючої» меню будь-якого типового блоку

Призначення опції «спливаючого» меню блоку:

*Властивості* – для виклику діалогового вікна параметрів блоку;

*Ім'я* – для присвоєння блоку оригінального імені;

*Заголовок* – для зміни підпису під блоком;

*Кольори, Шрифт* – дублюють аналогічні опції з меню *Стиль*);

*Виходи, Входи* – для зміни розташування вихідних і вхідних портів блоку;

*Пароль* – для «засекречування» параметрів блоку, а стосовно до макроблоку – для «закриття» небажаного доступу до внутрішньої структури субмоделі.

Опція *Стану* в даній версії ПК «МВТП» не працює.

**Етап 4 – установка параметрів інтегрування.** Перемістити курсор на командну кнопку **Параметри розрахунку** й однократно клацніть *лівою* клавiшею миші – відкриється діалогове вікно для установки параметрів інтегрування. Виберіть чисельний метод, наприклад «Адаптивний 1». Далі введіть параметри: час інтегрування 15 (с); мінімальний крок інтегрування 0.0004 (с); максимальний крок інтегрування 0.04 (с); число точок виводу 150. Параметр точності можна залишити тим же (за замовчуванням 0.001).

Час інтегрування повинне бути не менше часу регулювання, тому його орієнтовно вибирають на один-два порядків більше, ніж сама більша постійна часу вихідної САР. У процесі моделювання час інтегрування уточнюється з урахуванням часу подачі обурюючого впливу.

Закрийте діалогове вікно, клацнувши *лівою* клавiшею миші по кнопці **ОК**. Збережіть цей етап завдання (кнопка **Зберегти**).

**Етап 5 – оформлення підписів, що пояснюють.** Оформіть Схемне Вікно, як це зроблено на рисунку 3.2.4. Перемістити курсор під блок порівнюючий *пристрій* і дворазово клацніть *лівою* клавiшею миші - з'явиться тимчасове вікно для введення тексту. Перемістити курсор у це вікно, клацніть *лівою* клавiшею миші і введіть заголовок даного блоку (в одну-три рядки). Перемістити курсор на вільне місце в Схемному Вікні й дворазово клацніть *лівою* клавiшею миші – тимчасове вікно закриється й під блоком з'явиться бажаний підпис. Якщо підпис вийшов неякісно (з помилками), знову відкрийте

тимчасове вікно для введення тексту (дворазовий клік *лівою* клав'яшею миші по тексту під блоком) і, використовуючи клав'яші редагування (**Backspace**, **Del** ін.), скорегуйте підпис.

Напис над блоками задаючій *вплив* (const) і *Східчастий обурюючий вплив* виконують за допомогою блоку *Замітка*.

**Довідка.** Підпис під блоком можна виконати й іншим способом. Перемістити курсор на редагуємий блок, однократно клацніть *правою* клав'яшею миші і у з'явившомуся «спливаючому» меню блоку клацніть *лівою* клав'яшею миші по рядку *Заголовок*. За допомогою «спливаючого» меню блоку можна редагувати й інші характерні властивості блоку.

Напис вгорі над блоками (або збоку), заголовки й пояснення виконують за допомогою блоку *Замітка* (кнопка без символів) у бібліотеці *Субструктури* (див. *Допомога* в діалоговому вікні блоку). При використанні процедури «перетаскування» блоків у Схемному Вікні варто пам'ятати, що виконані в такий спосіб написи не пов'язані із блоками й вимагають при необхідності самостійної процедури «перетаскування» (окремо jt блоків).

Інтерфейс ПК «МВТУ» дозволяє змінити в підписі тип, розмір і колір шрифту. Виділіть блок, відкрийте меню *Стиль* і виберіть опцію *Шрифт підпис блоку*. Відкриється діалогове вікно *Вибір шрифту*, у якому ви можете встановити бажані параметри підпису, наприклад: шрифт – ArialСут; накреслення – Звичайний; кольори – Червоний; розмір – 10. При закритті діалогового вікна *Вибір шрифту* (клік по кнопці **ОК**) відбувається автоматичне повернення в середовище ПК «МВТУ».

Використовуючи меню *Стиль* і його опції, можна змінити фон блоку і усього Схемного Вікна, кольори ліній зв'язку (виділивши редагуємий блок попередньо, або лінію зв'язку однократним кліком *лівою* клав'яшею миші).

Виконавши вищеописані процедури для всіх блоків, додайте уведеної вами структурній схемі вид, близький до рисунку 2.4.

Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

**Етап 6 – відкриття графічного вікна й зміна його розмірів.** Перемістити курсор на блок *Графік  $I(t)$* , однократно клацніть *правою* клав'яшею миші і в «спливаючому» меню блоку *лівою* клав'яшею миші виберіть опцію *Властивості*. Перший рядок *Число входів* у діалоговому вікні (рисунок 3.2.14) не вимагає редакції, тому що в ній за замовчуванням введене значення **1**.

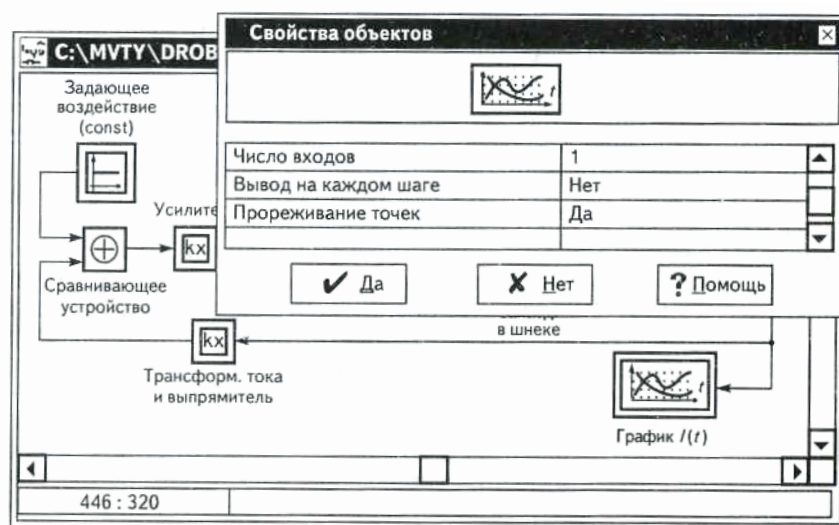


Рисунок 3.2.14. Схемне Вікно з діалоговим вікном блоку *Часовий графік*

Перемістити курсор на поле введення другого діалогового рядка *Вивід на кожному кроці*, у якій за замовчуванням введено **Ні**, і однократно клацніть *лівою* клав'яшею миші – у поле введення з'явиться спеціальна кнопка. Клацнувши по цій кнопці *лівою* клав'яшею миші, ви маєте можливість вибору: **Немає** або **Так**.

Якщо ви вибрали **Так**, то при моделюванні в графічному вікні будуть відображатися всі зміни лінії графіка після кожного кроку інтегрування, а при виборі **Немає** – зміни лінії графіка через часовий інтервал приблизно дорівнює відношенню *Часу інтегрування* до *Числа точок виводу* (див. діалогове вікно *Параметри розрахунку*).

У третьому рядку діалогового вікна (*Проріджування точок*) за замовчуванням введено **Так**. При необхідності мати інформацію про всі розрахункові дані, виведених на графік, треба в поле введення цього рядка змінити **Так** на **Немає**.

**Увага!** Якщо в третьому діалоговому рядку введено **Так**, то в обох варіантах заповнення другого діалогового рядка (**Немає** або **Так**) відображувані дані піддаються *проріджуванню* по алгоритму: якщо три послідовні розрахункові точки лежать на одній прямій (із заданою точністю), те середня точка не відображається на графіку, тому що відрізок, проведений через першу й третю точки, містить і другу точку.

Закрийте діалогове вікно блоку *Часовий графік* (клік по кнопці **ОК**) і дворазово клацніть *лівою* клав'яшею миші по зображенню цього блоку в Схемному вікні – відкриється графічне вікно (рисунок 3.2.15) із заголовком *Графік I(t)*.



Рисунок 3.2.15. Схемне Вікно із графічним вікном

Для переносу графічного вікна в інше місце необхідно перемістити курсор на його заголовок, нажати *ліву* клав'яшу миші і не відпускаючи її, «перетягнути» вікно в бажане місце. Його розміри змінюють так само, як і будь-яких інших вікон у середовищі Windows.

*Інші параметри графічного вікна встановимо після моделювання перехідних процесів.*

Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

**Моделювання перехідних процесів і варіантні розрахунки.** Відкрийте графічне вікно (див. рисунок 3.2.15) дворазовим кліком лівої клав'яші миші по блоці *Графік I(t)*. Перемістити курсор на командну кнопку **Продовжити** й клацніть *лівою* клав'яшею миші – ви запустили створене завдання на рахунок. У графічному вікні можна спостерігати хід побудови графіка в процесі розрахунку (рисунок 3.2.16).

У випадку появи спеціального інформаційного вікна Виникли *помилки* з повідомленням *Попередження: Задана точність не забезпечується* перемістити курсор на кнопку **Параметри розрахунку** і змінити мінімальний крок інтегрування на нове значення, для чого введіть  $1e^{-12}$  (це означає  $1 \cdot 10^{-12}$ ) і повторіть процес моделювання. Якщо при такому

різкому зменшенні мінімального кроку інтегрування від перехідного процесу не зміниться, то повідомлення про точність можна проігнорувати, тому що задана точність може не забезпечуватися тільки на першому кроці моделювання (тобто при відпрацьовуванні східчастого впливу).

Дані розрахунку свідчать, що при  $k_y = 5$  вихідна САР нестійка й перехідний процес розбіжний.

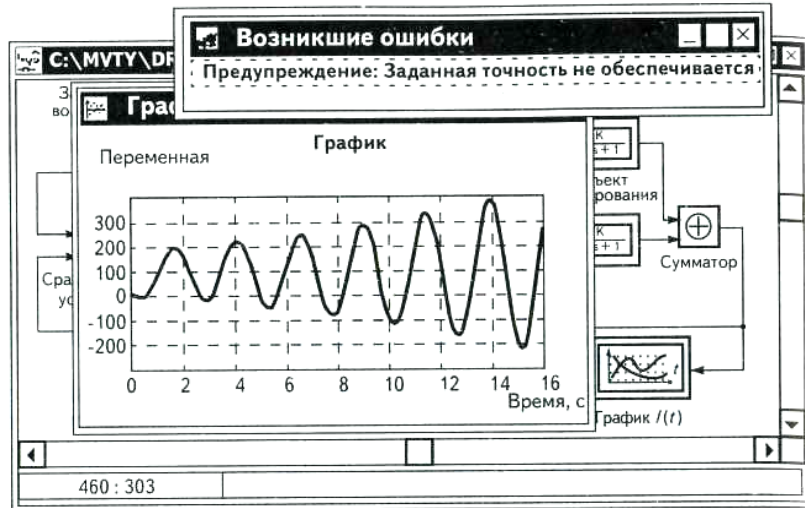


Рисунок 3.2.16. Схемне Вікно з результатами розрахунків

Закінчивши моделювання перехідного процесу, продовжіть редагування графічного вікна. Перемістити курсор у центральну частину графічного вікна й однократно клацніть *правою* клавішею миші – з'явиться командне меню графічного вікна. Клацніть *лівою* клавішею миші по рядку Властивості – відкриється діалогове вікно (рисунок 3.2.17) блоку Часовий графік, що має внизу три «закладки»: *Графіки*, *Вісь X* і *Вісь Y*, причому «закладка» *Графіки* буде активною.

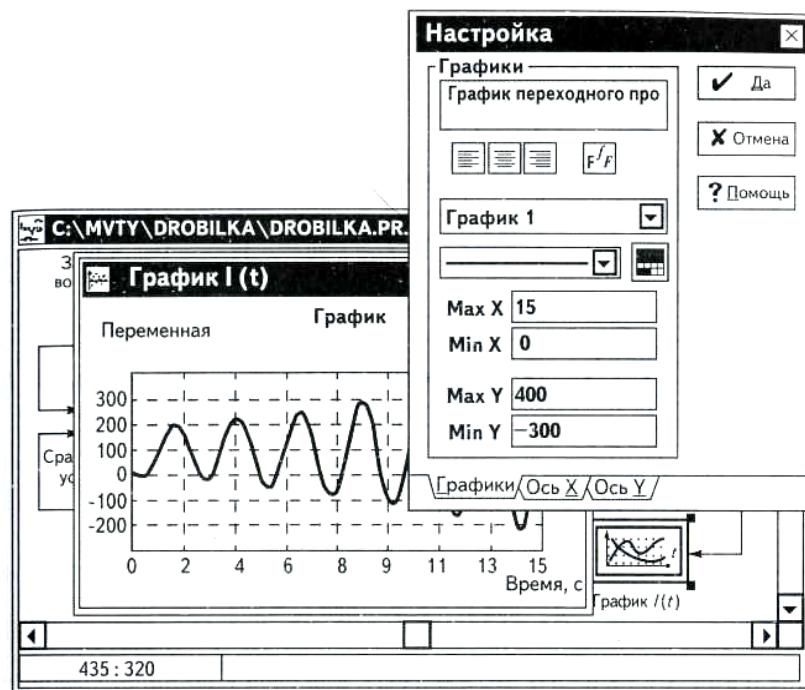


Рисунок 3.2.17. Схемне Вікно із діалоговим вікном блоку Часовий графік

Перемістити курсор у верхнє діалогове вікно блоку *Графік  $I(t)$*  і скорегуйте назву – Графік перехідного процесу при  $k_v = 5$ . Ініціалізуйте «закладку» Вісь X, доповніть підпис під віссю абсцис – Час с. Ініціалізавши «закладку» Вісь Y, зітріть підпис по осі Y (змінна) і введіть новий підпис –  $I(t)$ , А. Закінчивши редагування параметрів графічного вікна, перемістити курсор на кнопку **Так** й закрийте дане діалогове вікно.

**ДОВІДКА.** Для зміни кольорів лінії на графіку при ініціалізованій «закладці» *Графіки* перемістити курсор на кольорову кнопку в діалоговому вікні, клацніть один раз лівою клавішею миші і цією же клавішею миші виберіть нові кольори лінії (**FG**), а правою клавішею – кольори поля графіка (**BG**).

При ініціалізованих «закладках» *Вісь X* або *Вісь Y*, клацнувши по кольоровій кнопці, можна встановити лівою клавішею миші кольори сітки по осях (**FG**), а *правою* клавішею миші кольори окантовки графіка (**BG**).

Введіть значення  $k_v = 2$ . Змініть в діалоговому вікні графічного вікна значення  $k_v$  у назві графіка. Повторіть процес моделювання.

На рисунку 3.2.18 показані графіки перехідних процесів при  $k_v = 5$  і  $k_v = 2$ .

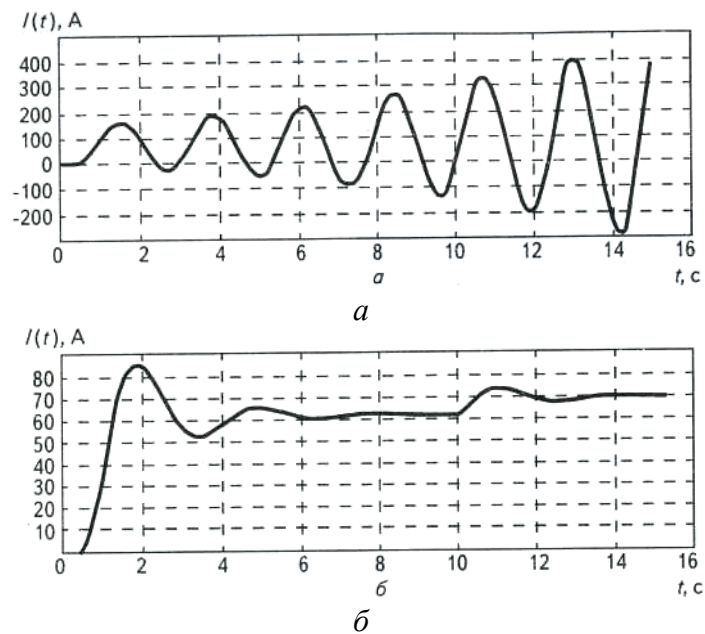


Рисунок 3.2.18. Графіки перехідних процесів САР:  
а – при  $k_v = 5$ ; б – при  $k_v = 2$

При необхідності аналізу значень параметрів у графічне вікно можна викликати таблицю з результатами розрахунків (рисунок 3.2.19). Для цього після моделювання перехідного процесу перемістити курсор у центральну частину графічного вікна й однократно клацніть *правою* клавішею миші – з'явиться Командне меню графічного вікна, у якому однократно клацніть *лівою* клавішею миші по рядку *Список*. Замість графіка у вікні з'явиться таблиця з результатами розрахунку перехідного процесу. Механізм прокручування у вікні дозволяє послідовно переглянути всю таблицю.

Для повернення до графіка ці операції варто повторити. Встановіть курсор у центральну частину графічного вікна й однократно клацніть *правою* клавішею миші. У Командному меню, що з'явився, однократно *клацніть* лівою клавішею миші по *рядку* *Список*. Замість таблиці у вікні з'явиться графік.

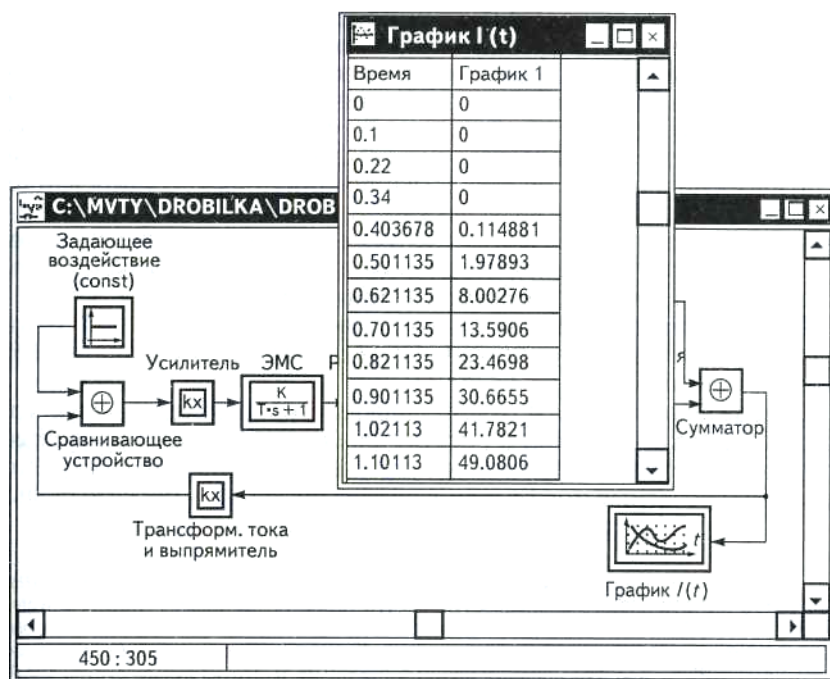


Рисунок 3.2.19. Схемне Вікно з таблицею результатів розрахунку перехідного процесу

**Виконання індивідуального завдання.** За завданням викладача для САР, розглянутої в демонстраційному прикладі, по варіанті таблиці 3.2.1 або для однієї із САР, наведених у додатку Б, підготуйте необхідні вихідні дані й виконайте моделювання.

### 3.2.1. Параметри передатних функцій САР завантаження зернодробарки (див. рисунок. 3.2.3)

| Варіант | $k_{01}, \text{A} \cdot \text{с/кг}$ | $k_{02}, \text{A/B}$ | $T_0, \text{з}$ | $\tau, \text{з}$ | $k_p$ | $k_{ш}, \text{кг/рад}$ | $K_{\Sigma}, \text{рад/(B} \cdot \text{с)}$ | $T_{\Sigma}, \text{з}$ | $k_y$       | $K_{\Sigma}, \text{B/A}$ | $I_{н}, \text{A}$ |
|---------|--------------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|-------|------------------------|---------------------------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| 1       | 125                                  | 0,33                 | 1,2             | 0,4              | 0,33  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...5...5   | 0,2                      | 62                |
| 2       | 100                                  | 0,263                | 1,0             | 0,5              | 0,22  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...6...6   | 0,2                      | 50                |
| 3       | 90                                   | 0,237                | 1,1             | 0,45             | 0,35  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...5...5,5 | 0,2                      | 45                |
| 4       | 110                                  | 0,29                 | 1,3             | 0,6              | 0,25  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...5...5   | 0,2                      | 55                |
| 5       | 80                                   | 0,21                 | 1,1             | 0,4              | 0,35  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...6...6,5 | 0,2                      | 40                |
| 6       | 130                                  | 0,34                 | 1,3             | 0,35             | 0,32  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...6...6   | 0,2                      | 65                |
| 7       | 140                                  | 0,368                | 1,4             | 0,4              | 0,23  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...7...7   | 0,2                      | 70                |
| 8       | 115                                  | 0,3                  | 1,35            | 0,52             | 0,3   | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...4...4,5 | 0,2                      | 58                |
| 9       | 150                                  | 0,395                | 1,3             | 0,4              | 0,25  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...6...6   | 0,2                      | 75                |
| 10      | 95                                   | 0,25                 | 1,15            | 0,45             | 0,33  | 0,042                  | 3,17                                        | 0,4                    | 1...6...6   | 0,2                      | 48                |

При моделюванні САР шляхом зміни коефіцієнта підсилення підсилювального органа визначите його критичне значення, тобто значення, за межами якого САР переходить у нестійкий режим. Потім для значення коефіцієнта підсилення менше критичного по перехідних функціях визначите основні показники якості системи: статичне відхилення (статичну помилку), час регулювання, перерегулювання, число перерегулювань і логарифмічний декримент загасання. Ці показники якості варто визначити по перехідних

функціях, отриманим окремо по задаючим і обурюючим впливам, використовуючи рекомендації глави 1.

При максимальному впливі, що обурює  $\Delta U_c = 70$  В припустима статична помилка САР  $\Delta I_{не}$  повинна перевищувати 10% номінального струму  $I_n$ .

**Зміст звіту.** У звіті повинні бути вихідна структурна схема досліджуваної САР, структурна схема її моделювання, графіки перехідних процесів, отримані в процесі моделювання, розрахункові показники якості системи, а також виводи.

### **Контрольні питання й завдання**

1. Які принципи побудови й роботи САР?
2. Поясніть поняття динамічного й статичного режиму САР.
3. Що таке стійкий і нестійкий режим роботи САР?
4. Що являють собою динамічні й статичні характеристики САР?
- Що таке передаточна функція елемента (об'єкта регулювання) САР?
5. Як встановляють функціональні й структурні схеми САР?
6. Що таке перехідна функція елемента й САР?
7. Дайте визначення поняття якості САР. Яка сутність оцінки якості САР по перехідних функціях (кривим розгону)?
8. Який вид можуть мати перехідні функції в реальних САР?
9. Що називають статичним відхиленням?
10. Що такий час регулювання?
11. Що являє собою перерегулювання?
12. Що таке число перерегулювань?
13. Що називають логарифмічним декриментом загасання?
14. Що таке критичний коефіцієнт підсилення підсилювального органа САР?
15. Що являє собою типова (елементарна) ланка? Приведіть класифікацію типових ланок.
16. Що таке математична модель САР? Які форми подання математичних моделей САР?
17. У чому сутність математичного моделювання САР за допомогою ПК «МВТУ»?
18. Який порядок складання структурної схеми моделювання САР?
19. Як вибирають крок інтегрування?
20. Яким приймають час інтегрування?
21. Як знаходять число точок видачі даних (результатів розрахунку)?

## **РОБОТА 3**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

#### **Мета роботи:**

- освоїти окремі поняття й питання теорії автоматичного регулювання (коригувальні елементи, структурно-нестійкі системи, тверді й гнучкі зворотні зв'язки як коригувальні елементи, введення в закон регулювання похідних й інтегралів, застосування астатичних ланок як коригувальні елементи);
- закріпити навички роботи із ПК «МВТУ».

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання роботи.** Варто знати принцип й методику моделювання САР за допомогою ПК МВТУ (див. розділ 2), а також поняття корекції САР і закони регулювання.

### Послідовність виконання роботи:

- виконати моделювання САР напруги синхронного генератора (див. рисунок 2.2) на основі підготовлених вихідних даних (див. п. 2.1); у процесі моделювання визначити критичний коефіцієнт підсилення  $k_1$  електронного підсилювача (ПО1);
- задати коефіцієнт підсилення  $k_1$ , на 10...15 % перевищуючий його критичне значення, і для нестійкого режиму САР досягти стабілізації системи з використанням окремих варіантів корекції (за завданням викладача), розглянутих нижче.

**Варіант 1.** Введення в закон регулювання похідних від сигналу неузгодженості (використання ПД-закона регулювання) за допомогою включення у вихідну САР (див. рисунок 2.2) коригувального елемента у вигляді ідеальної ланки, що диференціює, на основі операційного підсилювача (див. табл. 1.1 і рисунок 3.3.1, а).

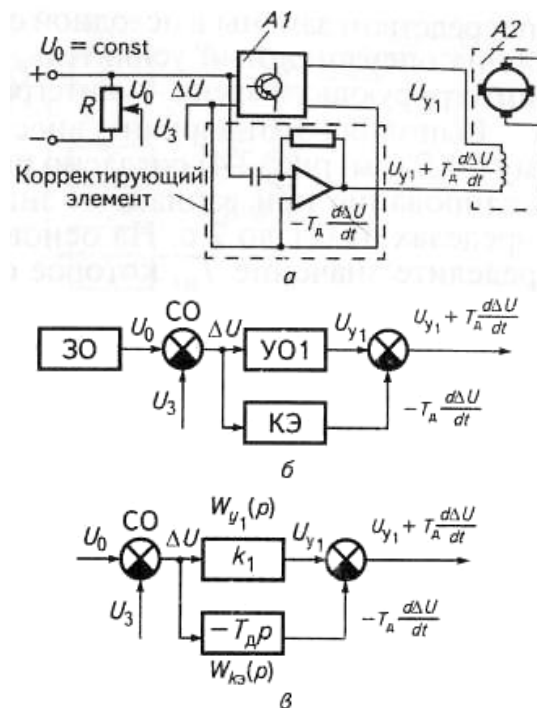


Рисунок 3.3.1. Фрагменти схем САР напруги синхронного генератора з коригувальним елементом у вигляді ідеальної ланки, що диференціює:

- а* – фрагмент принципової схеми (розглядати разом з рисунком 2.2);
- б* – фрагмент функціональної схеми (розглядати разом з рисунком 2.3);
- в* – фрагмент структурної схеми (розглядати разом з рисунком 2.4)

При виконанні даного варіанта внесіть зміни в структурну схему САР (рисунок 3.2.4) відповідно до рисунку 3.3.1, в і виконайте комп'ютерне моделювання скоректованої системи при різних значеннях постійної часу  $T_d$  (від 1 с до значення, що забезпечує задовільні показники якості перехідного процесу при максимальному значенні обурюючого впливу  $\Delta U$ ).

**Варіант 2.** Введення в закон регулювання інтеграла від сигналу неузгодженості (використання І-закона регулювання) за допомогою заміни у вихідній схемі САР (рисунок 3.2.2) підсилювача *А1* на операційний підсилювач, включений за схемою ідеальної інтегруючої ланки – інтегратора (див. табл. 1.1; рисунок 3.3.2, а).

Виконуючи цей варіант, внесіть зміни в структурну схему САР (див. рисунок 2.4) відповідно до рисунку 3.3.2, в і виконайте її моделювання при варіаціях значень постійної часу  $T_i$  в межах від 0,1 до 2 с. На основі результатів моделювання визначіть значення  $T_i$ , що

забезпечує задовільні показники якості перехідного процесу при максимальному значенні обурюючого впливу  $\Delta I$ .

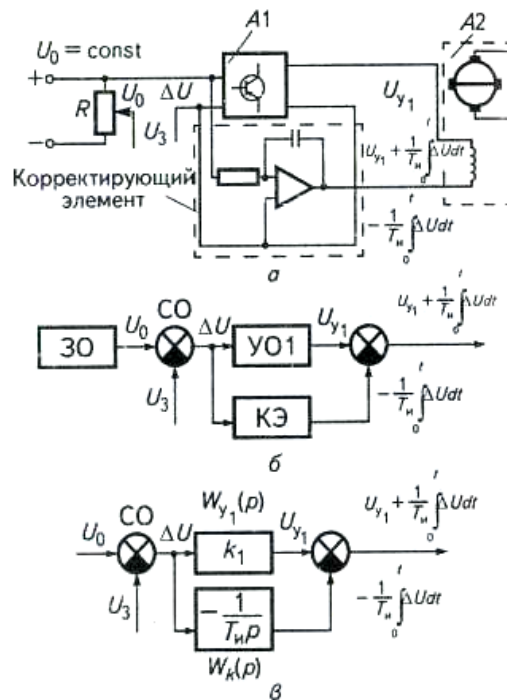


Рисунок 3.3.2. Фрагменти схем САР напруги синхронного генератора з І-законом регулювання:

- a* – фрагмент принципової схеми (розглядати разом з рисунком 2.2);
- б* – фрагмент функціональної схеми (розглядати разом з рисунком 2.3);
- в* – фрагмент структурної схеми (розглядати разом з рисунком 2.4)

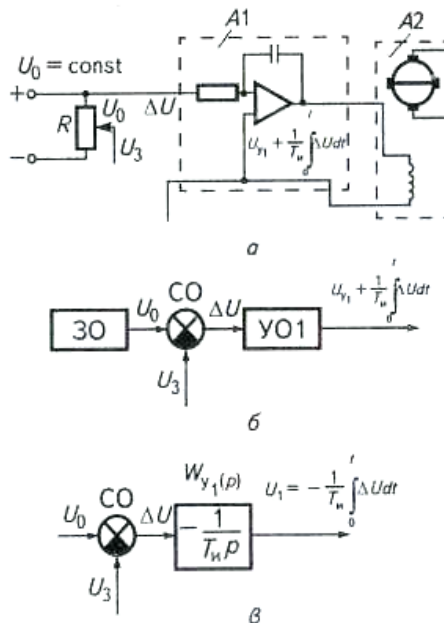


Рисунок 3.3.3. Фрагменти схем САР напруги синхронного генератора з ПІ-законом регулювання:

- a* – фрагмент принципової схеми (розглядати разом з рисунком 2.2);
- б* – фрагмент функціональної схеми (розглядати разом з рисунком 2.3);
- в* – фрагмент структурної схеми (розглядати разом з рисунком 2.4)

**Варіант 3.** Додаткове введення в закон регулювання інтеграла від сигналу неузгодженості (використання Пі-закону регулювання) за допомогою коригувального елемента на основі операційного підсилювача, що реалізує схему ідеальної інтегруючої ланки – інтегратора (див. табл. 1.1; рисунок 3.3.3, а).

При виконанні даного варіанта змініть структурну схему вихідної САР (рисунок 2.4) відповідно до рисунка 3.3.3, в і виконайте комп'ютерне моделювання САР при варіаціях значень постійної часу  $T_i$  в межах від 0,1 до 2 і коефіцієнта підсилення  $k_1$  від критичного до 1. У процесі моделювання визначіть значення  $T_i$  й  $k_1$ , які забезпечують задовільні показники якості процесу регулювання при максимальному східчастому обурюючому впливі  $\Delta I$ .

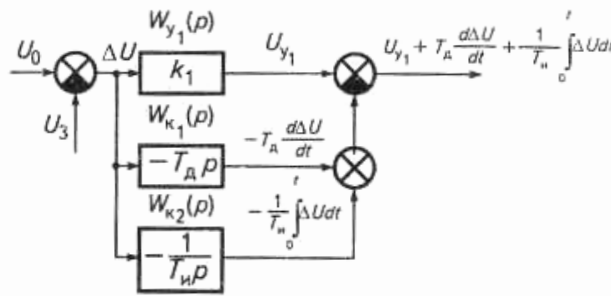


Рисунок. 3.3.4. Фрагмент структурної схеми САР напруги синхронного генератора з ПД-законом регулювання

**Варіант 4.** Введення в закон регулювання похідної й інтеграла від сигналу неузгодженості (застосування ПД-закону регулювання) за допомогою спільного використання коригувальних елементів на основі операційних підсилювачів (див. табл. 1.1), що реалізують ідеальні диференціальні (рисунок 3.3.1, а) і інтегруючі (рисунок 3.3.2, а) ланки.

При виконанні даного варіанта змініть структурну схему вихідної САР (рисунок 2.4) відповідно до фрагмента схеми, наведеним на рисунок 3.3.4.

У процесі комп'ютерного моделювання скоректованої САР, змінюючи значення постійних часу  $T_d$  від 1 до 2 с,  $T_i$  від 0,1 до 2 с і коефіцієнта підсилення  $k_1$  від критичного до 1, визначіть їхнє значення, які забезпечують задовільні показники якості процесу регулювання при максимальному значенні східчастого впливу  $\Delta I$ .

**Варіант 5.** Охват електронного підсилювача негативним твердим зворотнім зв'язком за допомогою резистора  $R_0$  включеного у вихідну схему САР (див. рисунок 2.2) відповідно до схеми, показаної на рисунку 3.3.5, а.

Такий коригувальний елемент являє собою безінерційну (пропорційну, ідеальну) ланку з передаточною функцією

$$W_k(p) = k_0,$$

де  $k_0$  – коефіцієнт зворотного зв'язку, що залежить від положення рухливого контакту резистора  $R_0$ : у верхнім крайньому положенні  $k_0 = 1$ , а у нижньому  $k_0 = 0$ .

У процесі комп'ютерного моделювання скоректованої САР визначіть значення коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_0$ , при якому забезпечується перехідний процес системи із задовільними показниками якості для випадку максимальної зміни східчастого обурюючого впливу  $\Delta I$ .

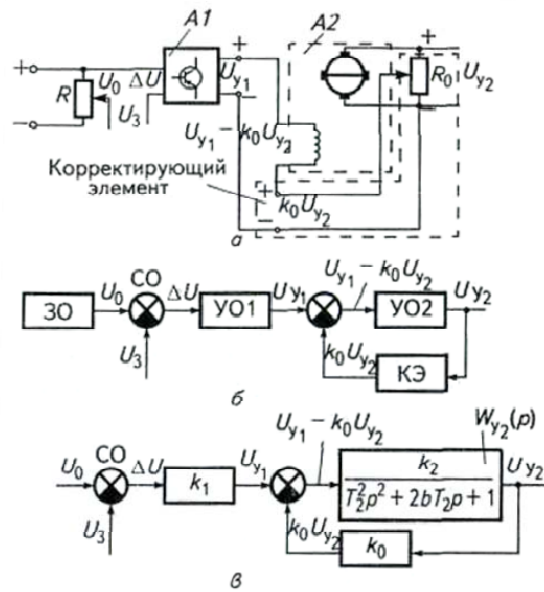


Рисунок 3.3.5. Фрагменти схем САР напруги синхронного генератора з коригувальним елементом у вигляді негативного твердого зворотного зв'язку:

- a* – фрагмент принципової схеми (розглядати разом з рисунком 2.2);
- б* – фрагмент функціональної схеми (розглядати разом с. рисунок 2.3);
- в* – фрагмент структурної схеми (розглядати разом з рисунком 2.4)

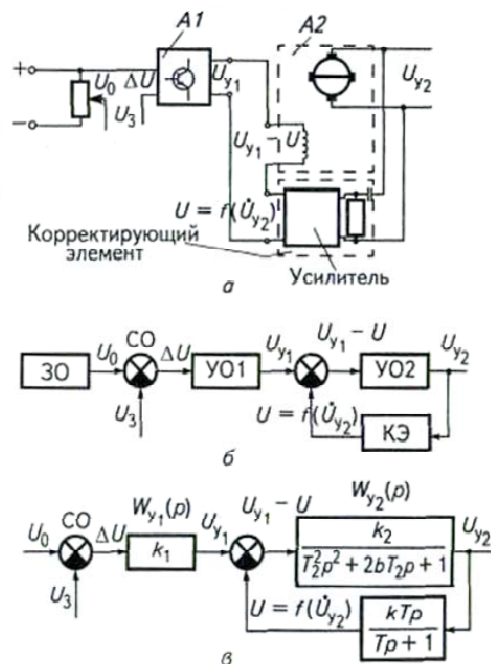


Рисунок 3.3.6. Фрагменти схем САР напруги синхронного генератора з коригувальним елементом у вигляді реальних диференціальних ланок:

- a* – фрагмент принципової схеми з *RC*-ланцюгом й електронним підсилювачем (розглядати разом з рисунком 2.2);
- б* – фрагмент функціональної схеми (розглядати разом з рисунком 2.3);
- в* – фрагмент структурної схеми (розглядати разом з рисунком 2.4)

**Варіант 7.** Охоплення електромашинного підсилювача гнучким негативним зворотнім зв'язком з використанням активного реального диференційного елемента у

вигляді RC-ланцюга (див. табл. 1.1), включеної на вхід підсилювача з більшим вхідним опором і коефіцієнтом підсилення  $k$  (рисунок 3.3.6, а).

При виконанні цього варіанта внесіть зміни в схеми САР (див. рисунок 2.2... 2.4) відповідно до рисунка 3.3.6, в і проведіть моделювання скоректованої системи, варіюючи значеннями параметрів  $k$  і  $T$  у межах відповідно від 1 до 10 і від 0,1 до 2 с. У процесі моделювання САР визначіть перехідний процес при максимальному значенні східчастого збурювання  $\Delta I$ , що відповідає необхідним показникам якості регулювання напруги генератора.

При підготовці вихідних даних і комп'ютерному моделюванні використовуйте рекомендації, наведені в розділі 2, і практичні приклади поетапної роботи із ПК «МВТП», розглянуті раніше.

**Зміст звіту.** У звіті повинні бути вихідна принципова й структурна схеми досліджуваної САР, її структурна схема моделювання, графіки перехідних процесів, побудовані за результатами моделювання, необхідні розрахунки й результати обробки графіків, а також висновки.

### **Контрольні питання й завдання**

1. Що являє собою структурно-стійка САР?
2. Що таке структурно-нестійка САР?
3. Який зворотний зв'язок називають твердим і який – гнучким?
4. Зобразіть схему пасивного реального елемента, що диференціює, на основі резистора й конденсатора.
5. Зобразіть схему активного реального елемента, що RC-диференціює.
6. Зобразіть схему пасивного елемента, що диференціює, на основі трансформатора.
7. Зобразіть схему активного елемента, що диференціює, на основі трансформатора.
8. Який вид має передаточна функція ідеальної диференційної ланки.
9. Який вид має передаточна функція реальної диференційної ланки?
10. Що являє собою пропорційно-диференціальний регулятор (ПД-регулятор)?
11. Що таке пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор)?
12. Що таке пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор)?
13. Яким образом статичну САР можна перетворити в астатичну? Що таке інтегральний регулятор (І-регулятор)?
14. Як визначити параметри інтегрування і число точок видачі даних при підготовці вихідних даних для моделювання САР у середовищі ПК «МВТУ»?

## **РОБОТА 4 ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

### **Мета роботи:**

- освоїти окремі поняття й питання теорії автоматичного регулювання (оптимальне керування; оптимальний перехідний процес; критерій оптимальності; інтегральні методи оцінки якості систем);
- закріпити навички роботи із ПК МВТУ і освоїти з його допомогою методику параметричної оптимізації САР на прикладах лінійних САР.

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання роботи:** особливості параметричної оптимізації САР (див. п. 1.2.4), функціональні можливості ПК «МВТП» і основні етапи роботи в його середовищі (див. п. 2.6, лабораторні роботи 1 й 2).

**Послідовність виконання роботи:**

- освоїти методику параметричної оптимізації САР за допомогою ПК «МВТУ» на базі демонстраційного приклада;
- по заданих варіантах (див. с. 98) самостійно оптимізувати САР за допомогою комп'ютерного моделювання.

**Демонстраційний приклад.** Для демонстраційного приклада взята САР з інтегральним регулятором, структурні схеми якої показані на рисунку 3.4.1.

Об'єкт регулювання описується двома передаточними функціями:  $W_2(p)$  і  $W_3(p)$ , параметри яких мають наступні значення:  $k_2=1$ ;  $T_2=1$  с;  $b=0,5$ ;  $k_3=0,6$ ;  $T_3=5$  с.

Коефіцієнт підсилення (передачі)  $k_1$  інтегрального регулятора є варіююча величина, оптимальне значення якого необхідно визначити в процесі моделювання САР при нульових початкових умовах і східчастому вхідному впливі  $U(t)=0,8 \cdot 1(t)$  з урахуванням наступних обмежень:

задане значення відхилення  $\Delta$  регульованої величини  $y$  повинне бути не більше 5 %, тобто  $\Delta = \pm 0,8 \cdot 0,05 = \pm 0,04$ ;

час перехідного процесу не більше 20 с;

перерегулювання не більше  $y_{max} \leq 0,8$ .

Потрібні дані для моделювання САР (рисунк 3.4.1, а) наступні:

структурна схема для введення в комп'ютер (рисунк 3.4.1, б);

максимальний крок інтегрування 0,1 с;

мінімальний крок інтегрування 0,001 с;

час інтегрування 40 с;

число точок виводу 400;

точність інтегрування 0,001.

Поетапно виконати всі процедури, рекомендовані в лабораторних роботах 1 й 2, а також додаткові етапи, необхідні при роботі із ПК МВТУ у режимі ОПТИМІЗАЦІЯ (див. с. 92).

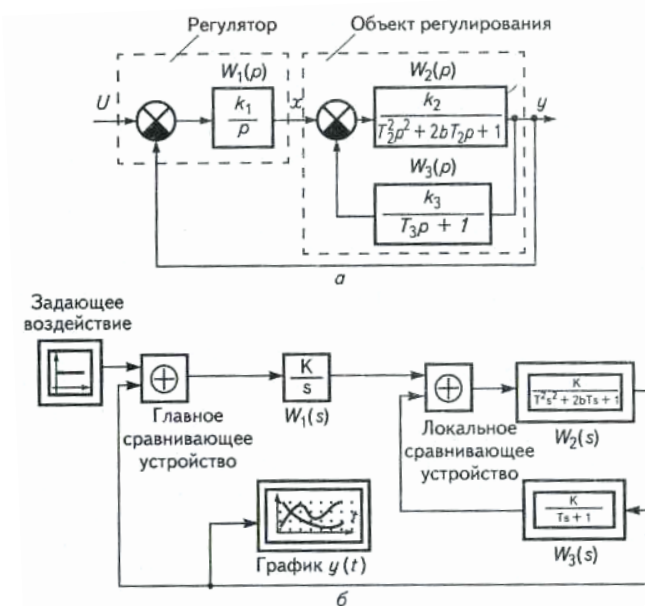


Рисунок 3.4.1. Структурні схеми САР:

а – вихідна; б – моделювання

При подальшому викладі методики й послідовності виконання демонстраційного приклада можна було б обмежитися тільки етапами, виконання яких обов'язково для режиму ОПТИМІЗАЦІЯ, не розглядаючи вивчені раніше етапи введення структурної схеми, вихідні дані й безпосереднє моделювання перехідних процесів. Однак для зручності й скорочення тимчасових витрат на виконання даної лабораторної роботи опис цих етапів тут приводиться повторно.

**Етап 1 – заповнення Схемного Вікна необхідними типовими блоками.** Перемістити курсор на вкладку **Новий** і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється чисте Схемне Вікно. Перемістити курсор на «закладку» *Джерела вхідних впливів* і клацніть один раз *лівою* клавішею миші – ви ініціалізували відповідну бібліотеку типових блоків. Перемістити курсор на блок *Східчастий вплив* (підпис *Сходінка*) і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – фон блоку в *Лінійці* змінився. Це означає, що блок можна «переносити» у Схемне Вікно. Перемістити курсор у верхній лівий кут Схемного Вікна й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – у поле Схемного Вікна з'явився стерпний блок. Перемістити курсор на «закладку» *Математичні Операції* і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – ви ініціалізували відповідну типову бібліотеку. Перемістити курсор на блок *Суматор* й однократно клацніть – фон блоку змінився. Перемістити курсор у поле Схемного Вікна на місце, де ви бажали б розташувати Головний порівнюючий пристрій і клацніть один раз *лівою* клавішею миші - перенос блоку Суматор у Схемне Вікно виконаний. Повторіть вищеописані дії й перенесіть на вільне місце в Схемному Вікні (нижче й правіше) другий Суматор, необхідний для моделювання *Локального порівнюючого пристрою*. Перемістити курсор на «закладку» *Динамічні ланки*, ініціалізуйте її, перенесіть необхідні блоки (*Інтегратор*, *Аперіодична ланка*, *Коливальна ланка*) у Схемне Вікно по вищеописаній процедурі приблизно на бажані місця. Виконайте останній перенос блоку в Схемне Вікно – перемістити курсор на «закладку» *Дані*, ініціалізуйте дану бібліотеку типових блоків, перенесіть блок *Часовий графік* у Схемне Вікно приблизно на бажане місце. Нарешті, перемістити курсор на велику кнопку в лівій частині *Лінійки типових блоків* й однократно клацніть – ви тимчасово «закрили» всі бібліотеки типових блоків.

**Етап 2 – проведення ліній зв'язку на структурній схемі.** Перемістити курсор на один із блоків *Суматор* (далі *Головний порівнюючий пристрій*) , натисніть на ліву клавішу миші і, не відпускаючи її, «перетягніть» цей блок так, щоб його верхній вхідний порт (надалі просто вхід) по горизонталі був на одному рівні з вихідним портом блоку задаючого впливу. Для спрощення цієї процедури рекомендується включити опцію *Сітка* в Схемному Вікні. Перемістити курсор на вільне місце у Схемному Вікні і однократно клацніть *правою* клавішею миші – «спливе» *Додаткове командне меню*, у якому необхідно зробити клік *лівою* клавішею миші по рядку *Сітка*. Далі перемістити курсор на вихідний порт блоку задаючий вплив клацніть *лівою* клавішею миші і, відпустивши клавішу, «протягніть» горизонтальну лінію зв'язку до верхнього порту блоку *Головний порівнюючий пристрій*. Знову однократно клацніть *лівою* клавішею – на верхньому вході з'явиться типова *вхідна стрілка*. Якщо ви зробили клік *лівою* клавішею раніше, ніж проведений зв'язок ввійшов «у притягання» вхідного порту, дотягніть лінію зв'язку до відповідного вхідного порту й клацніть *лівою* клавішею миші.

При необхідності повороту на кут  $\pm 90^\circ$  лінії зв'язку клацніть по ній *лівою* клавішею миші і продовжуйте проведення лінії зв'язку в новому напрямку.

Якщо ви бажаєте перервати процедуру проведення лінії зв'язку (наприклад, через зовнішній вигляд – «некрасива»), натисніть клавішу **Shift** і, не відпускаючи її, клацніть *лівою* клавішею миші – лінія обірветься. Далі цю лінію можна видалити. Для цього виділіть лінію кліком лівої клавіші миші і видалити її за допомогою командної кнопки **Вирізати** (піктограма «ножиці»).

С використанням аналогічних процедур уточніть розташування блоків прямого ланцюга структурної схеми [ $W_1(s)$ , *Локальний порівнюючий пристрій*  $W_2(s)$ ] і проведіть лінії зв'язку. Перемістити курсор на блок  $W_3(s)$ , натисніть на клавіатурі клавішу **Shift** і, не відпускаючи її, натисніть один раз на *ліву* клавішу миші – порти блоку повернуться на кут  $90^\circ$  проти ходу годинної стрілки. Повторіть цю процедуру ще раз – орієнтація блоку стане праворуч ліворуч. Уточніть розташування блоку  $W_3(s)$ , використовуючи процедуру «перетаскування» блоків у Схемному Вікні. Проведіть лінії зв'язку від блоку  $W_2(s)$  до блоку з  $W_3(s)$  і далі від нього до другого (нижнього) вхідного порту блоку *Локальний порівнюючий пристрій*.

Перемістити курсор на лінію зв'язку від блоку  $W_2(s)$  до блоку  $W_3(s)$  (переважніше на точку останнього повороту лінії зв'язку), натисніть на клавіатурі клавішу **Ctrl** і, не відпускаючи її, клацніть *лівою* клавішею миші – з'явиться темна точка. Відпустивши обидві клавіші, проведіть лінію зв'язку (малої довжини) вниз – ви одержали «відгалуження» від існуючої лінії зв'язку. Використовуючи вищеописані процедури, продовжіть лінію *Головного зворотного зв'язку* до другого вхідного порту блоку *Головний порівнюючий пристрій*.

Перемістити блок *Часовий графік*, зробіть «відгалуження» від *Головного зворотного зв'язку* і продовжіть його до входу в блок *Часовий графік*.

У результаті виконаних етапів повинна бути набрана структурна схема моделювання, подібна показаній на рисунку 3.4.1, б. Надалі зробіть пояснюючі підписи на схемі.

Збережіть введену частину завдання. Для цього перемістити курсор у **Головному Вікні** на кнопку **Зберегти як...** й однократно клацніть *лівою* клавішею миші. У діалоговому вікні, що з'явилося, ініціалізуйте рядок і наберіть оригінальне ім'я вашого завдання, **наприклад mvtu\_lab.prj** (розширення може бути іншим, необов'язково **.prj**). Закрийте *Вікно збереження*, клацнувши по кнопці **ОК**.

Перемістити курсор на лівий нижній кут окантовки Схемного Вікна з'явиться спеціальна *похила* двостороння стрілка типу  $\leftrightarrow$ ) і змініть розмір Схемного Вікна так, щоб праве й нижнє поле становили приблизно по 2...3 см.

Якщо набрана структурна схема не «вписалася» у розміри Схемного Вікна, перемістити курсор на командну кнопку **Побачити всю схему** і однократно клацніть *лівою* клавішею миші. Відбудеться перемасштабування структурної схеми, і вона стане спостережуваною в Схемному Вікні повністю.

Збережіть цей етап завдання, клацнувши *лівою* клавішею миші по кнопці **Зберегти**.

**Етап 3 – введення параметрів структурної схеми.** Перемістити курсор на блок *Вхідний вплив* і дворазово клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється діалогове вікно цього блоку. Ініціалізуйте діалоговий рядок, введіть *через пробіл* 0 0 0.8 (три числа) і натисніть на кнопку **ОК**. Повторіть аналогічні процедури для блоків  $W_2(s)$  і  $W_3(s)$ , введіть відповідні значення  $k$ ,  $T$  і початкові умови. Відкрийте діалогове вікно блоку *Головний порівнюючий пристрій* і переконайтеся в тім, що в діалоговий рядок уже введені необхідні параметри (за замовчуванням) : +1 й -1 *через пробіл*. При моделюванні в блоці *Суматор* відбувається алгебраїчне додавання двох сигналів з урахуванням введених коефіцієнтів, тобто першого з ваговим коефіцієнтом 1, а другого з коефіцієнтом -1.

Повторіть аналогічні процедури для блоку *Локальний порівнюючий пристрій*, що забезпечує негативний зворотний зв'язок.

Відкрийте діалогове вікно блоку  $W_1(s)$ , введіть приблизне значення коефіцієнта підсилення, дорівнює 1. Початкова умова вже встановлена (за замовчуванням). Закрийте діалогове вікно.

Збережіть цей етап завдання, клацнувши по командній кнопці **Зберегти**.

**Увага!** Діалогове вікно будь-якого типового блоку можна відкрити й іншим способом. Для цього перемістити курсор на редагуємий блок і однократно клацніть

правою клавішею миші – з'явиться «спливаюче» меню блоку (рисунок 3.4.2). Клацнувши лівою клавішею миші по опції *Властивості* цього меню, можна викликати діалогове вікно блока.

Призначення опції «спливаючого» меню блоку:

*Властивості* – для виклику діалогового вікна параметрів блоку;

*Ім'я* – для присвоєння блоку оригінального імені;

*Заголовок* – для зміни підпису під блоком;

*Кольори, Шрифт* – для дублювання аналогічних опцій з меню *Стиль*;

*Виходи, Входи* – для зміни розташування вихідних і вхідних портів блоку, а стосовно до деяких блоків *Спеціалізованих бібліотек* – для додавання/видалення портів, зміни типу сигналів на входах/виходах блоку;

*Пароль* – для «засекречування» параметрів блоку стосовно до макроблоку – для «закриття» небажаного доступу до внутрішньої структури субмоделі.

Опція *Стану* в даній версії ПК MBTU не працює.

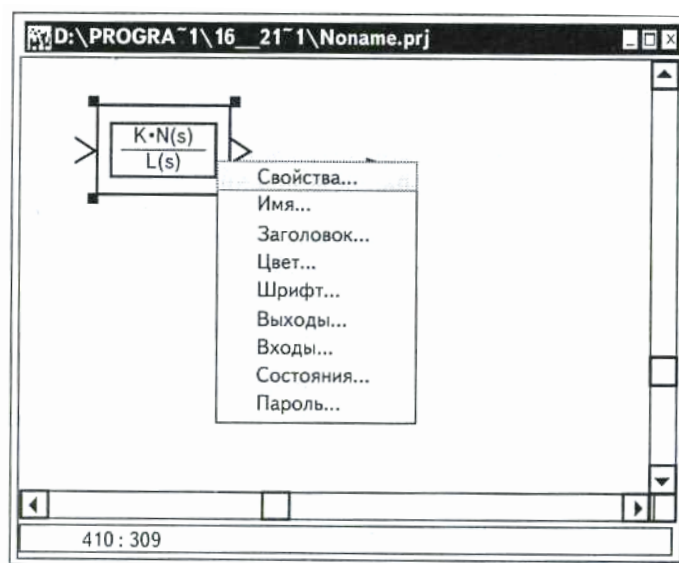


Рисунок 3.4.2. Схемне Вікно з «спливаючої» меню будь-якого блоку

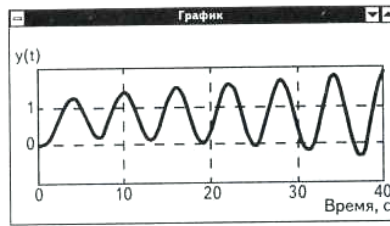
**Етап 4 – установка параметрів інтегрування.** Перемістити курсор на командну кнопку **Параметри розрахунку** й однократно клацніть лівою клавішею миші – відкриється діалогове вікно для установки параметрів інтегрування. Виберіть чисельний метод, наприклад «Адаптивний 1». Далі введіть параметри: час інтегрування 40 (с); мінімальний крок інтегрування 0.001 (с); максимальний крок інтегрування 0.1 (с); число точок виводу 400. Параметр точності можна залишити тим же (за замовчуванням 0.001). Закрийте діалогове вікно, клацнувши лівою клавішею миші по кнопці ОК.

Збережіть цей етап завдання (кнопка **Зберегти**). **Моделювання перехідних процесів і варіантні розрахунки.** Перемістити курсор на командну кнопку **Продовжити** і клацніть лівою клавішею миші – ви запустили створене завдання на рахунок. По закінченні розрахунку з'явиться спеціальне інформаційне вікно *Виниклі помилки* з повідомленням *Попередження: Задана точність не забезпечується*.

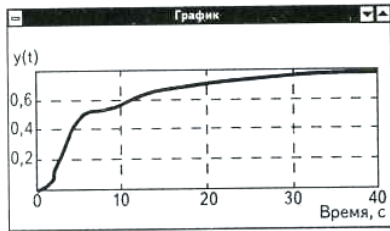
Перемасштабуйте графічне вікно дворазовим кліком лівою клавішею миші. Перемістити курсор на кнопку **Параметри розрахунку**, змініть мінімальний крок інтегрування на нове значення ( $1e^{-10}$ ) і повторіть процес моделювання.

Дані розрахунку показують, що, по-перше, зовнішній вигляд перехідного процесу не змінився при різкому зменшенні мінімального кроку інтегрування, тому що при кроці

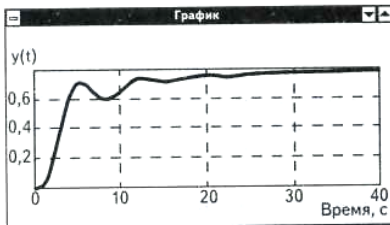
0,001 задана точність не забезпечувалася тільки на першому кроці моделювання, тобто при відпрацьовуванні східчастого впливу. Тому повідомлення про точність можна було проігнорувати. По-друге, при  $k_1 = 1$  вихідна САР нестійка й перехідний процес розбіжний (рисунок 3.4.3, а).



а



б



в

Рисунок 3.4.3. Графіки перехідних процесів САР:

а – при  $k_1 = 1$ ; б –  $k_1 = 0,2$ ; в –  $k_1 = 0,35$

Змініть значення  $k_1$  на 0,2. Повторіть процес моделювання, перемасштабуйте графічне вікно по закінченні розрахунку.

Дані свідчать, що хоча перерегулювання і відсутнє, але час перехідного процесу значно перевищує 20 с (рисунок 3.4.3, б).

Снову змініть значення  $k_1$  на 0,35. Повторіть вищеописані процедури. Аналіз розрахункових даних показує, що при  $k_1 = 0,35$  отримані необхідні характеристики перехідного процесу: перерегулювання відсутнє; час входу в 5% «трубку» не перевищує 20 с (рисунок 3.4.3, в).

**Параметрична оптимізація САР.** При параметричній оптимізації САР з використанням ПК «МВТП» необхідно виконати наступні етапи:

- задати варіюємий параметр як *глобальний параметр*, використовуючи стандартні процедури (клавіші **F8**, **→**) і далі вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*;
- сформулювати *локальні* критерії якості (оптимізації), які необхідні для рішення основного завдання оптимізації;
- ввести в діалогові вікна режиму ОПТИМІЗАЦІЯ необхідні дані: імена варіюємих параметрів, межі їхньої зміни й погрішність розрахунку;
- імена локальних критеріїв і припустимі межі їхніх значень;
- розрахунковий метод оптимізації і його параметри;
- запустити завдання на рахунок і чекати результатів.

Для демонстраційного приклада (див. с. 86) відповідно до розглянутих етапів 1...4 виконайте параметричну оптимізацію в послідовності, наведеної нижче.

Переконайтеся, що Схемне Вікно активне, і потім натисніть клавішу **F8** – відкриється вікно *Глобальні параметри*, реалізоване через вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* (рисунок 3.4.4). Введіть із клавіатури:  $k_1 = 1$ . Закрийте вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*, клацнувши «мишею» по кнопці **Да**.

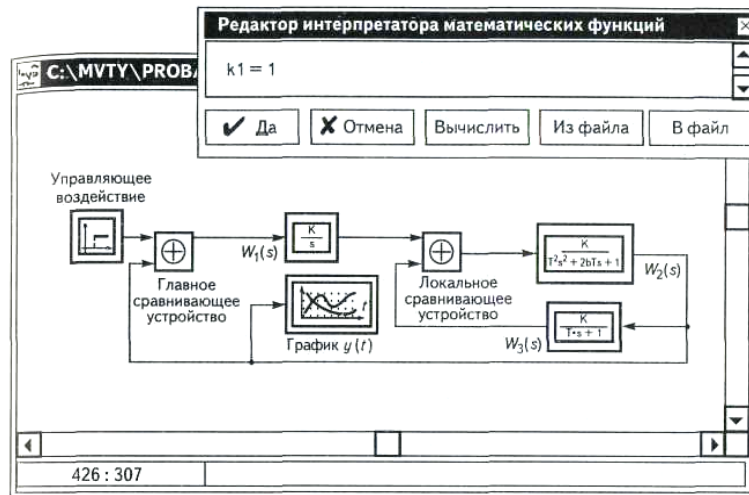


Рисунок 3.4.4. Схемне Вікно з вікном *Глобальні параметри*

Відкрийте діалогове вікно (рисунок 3.4.5) блоку *Інтегратор (Регулятор)* і змініть значення коефіцієнта підсилення, ввівши замість числа параметр  $k_1$  (символ). Закрийте діалогове вікно блоку *Інтегратор (Регулятор)*, клацнувши «мишею» по кнопці **Да**.

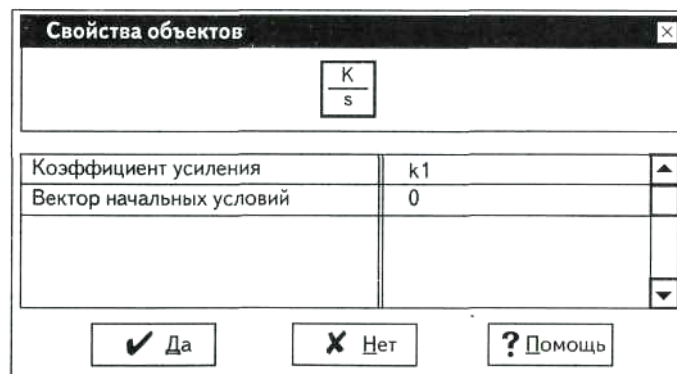


Рисунок 3.4.5. Діалогове вікно блоку *Інтегратор (Регулятор)*

Перенесіть у Схемне Вікно блоки *Максимум* (бібліотека «Нелінійні ланки») і *У Пам'ять* (бібліотека «Субструктури»). Перемістити їх у необхідне місце Схемного Вікна, проведіть необхідні лінії зв'язку і зробіть пояснюючі підписи.

Відкрийте командне меню *Файл* і в «падаючому» меню виберіть опцію *Вставити субмодель* – відкриється відповідне діалогове вікно середовища Windows. Знайдіть у списку файл **time\_p\_p.subi** перенесіть його ім'я в рядок *Ім'я файлу*. Закрийте це вікно, клацнувши по кнопці **ОК**. Перемістити курсор у ту частину Схемного Вікна, де повинна бути розташована необхідна субмодель, і зробіть клік *лівою* клавішею миші – у даному місці Схемного Вікна з'явиться субмодель *Вимірник часу ІІІ*. З'єднайте лінією зв'язку

субмодель *Вимірник часу* ППЗі структурною схемою САР (рисунок 3.4.6). Збережіть завдання з оригінальним ім'ям, наприклад **optim.prj**.

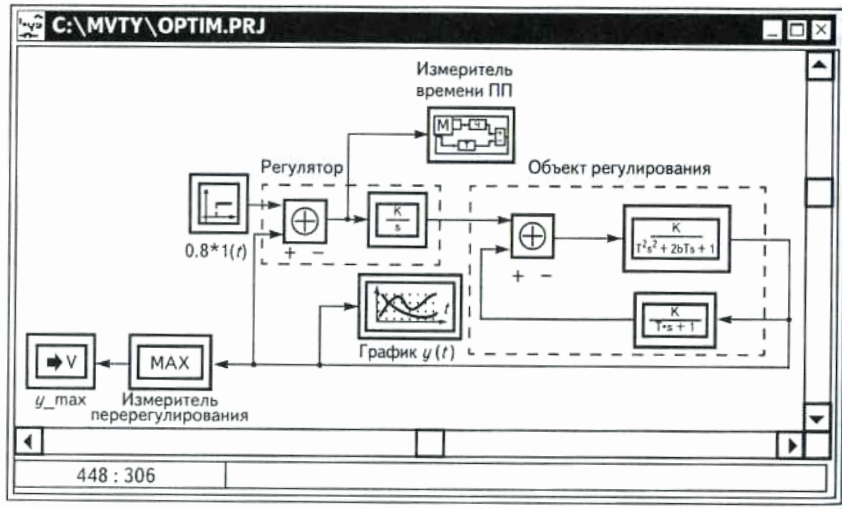


Рисунок 3.4.6. Структурна схема САР «Синтез оптимального регулятора»

У діалоговому вікні блоку *У пам'ять* (рисунок 3.4.7) у рядку *Ім'я змінної* введіть  $y_{\max}$ . Закрийте це вікно, клацнувши по кнопці **Так**. Зміна в рядку *Список змінних* відбудеться після вторинного відкриття цього вікна.

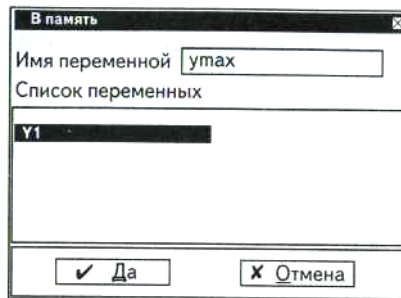


Рисунок 3.4.7. Діалогове вікно блоку *У пам'ять*

Перемістити курсор на субмодель і дворазово клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється субмодельне Схемне Вікно (рисунк 3.4.8). Процедуру відкриття субмодельного вікна можна виконати й іншим способом. Для цього треба ініціалізувати субмодель кліком *лівої* клавіші миші і потім на клавіатурі натиснути клавішу **PgDn**.

Перемістити курсор на блок з підписом *Величина «трубки»* (рисунок 3.4.8), відкрийте його діалогове вікно (рисунок 3.4.9) і змініть:

у першому діалоговому рядку 0.05 на 0.04, що відповідає 5% «трубці» від майбутнього сталого значення регульованої змінної, рівного 0.8;

у другому діалоговому рядку із двох варіантів **Скаляр** або **Вектор** виберіть перший.

Закрийте це діалогове вікно.

Перемістити курсор на блок *У пам'ять* (рисунок 3.4.8) і дворазовим кліком *лівої* клавіші миші відкрийте його діалогове вікно (рисунок 3.4.10). Введіть у рядку *Ім'я змінної* **trp**. Закрийте діалогове вікно цього блоку. Зміна в рядку *Список змінних* відбудеться після вторинного відкриття цього вікна.

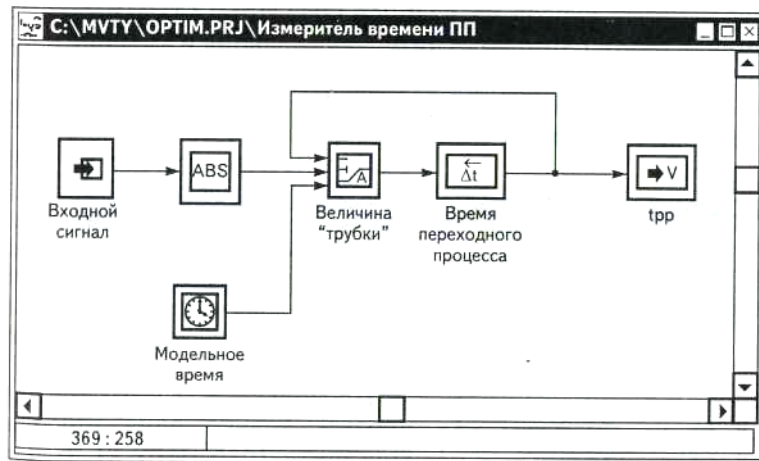


Рисунок 3.4.8. Субмодульне Схемне Вікно

Дана субмодель реалізує вимір часу перехідного процесу й автоматичне присвоєння цього значення змінної **tpp**.

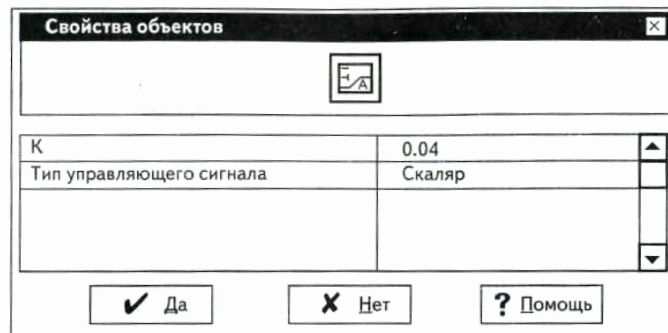


Рисунок 3.4.9. Діалогове вікно блоку *Ключ* (*Величина «трубки»*)

Схема працює в такий спосіб. На середній (логічний) вхідний порт *Ключа* (*Величина «трубки»*) подається модуль сигналу неузгодженості. Якщо цей сигнал більше уставки, то на вихід *Ключа* передається сигнал із третього (нижнього) вхідного порту, тобто поточний модельний час. Якщо керуючий сигнал (на середньому вхідному порту) менше уставки, то на вихід *Ключа* передається сигнал з першого (верхнього) вхідного порту, тобто той же сигнал, але затриманий на один крок інтегрування. Затримку на один крок інтегрування здійснює типовий блок *Час перехідного процесу* (*Затримка на крок інтегрування* з бібліотеки *Дискретні ланки*).

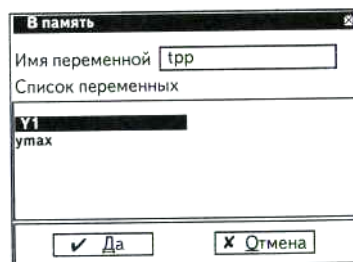


Рисунок 3.4.10. Діалогове вікно блоку *У пам'ять* субмодельного Схемного Вікна

Закрийте субмодель, дворазово клацнувши *лівою* клавішею миші у вільному місці субмодельного Схемного Вікна або нажавши на клавішу **PgDn**.

Перемістити курсор на напис ОПТИМІЗАЦІЯ в командному меню, однократно клацніть лівою клавішею миші і в «падаючому» меню виберіть опцію *Параметри* – відкриється діалогове вікно режиму ОПТИМІЗАЦІЯ з активної (за замовчуванням) «закладкою» *Параметри* (рисунок 3.4.11).

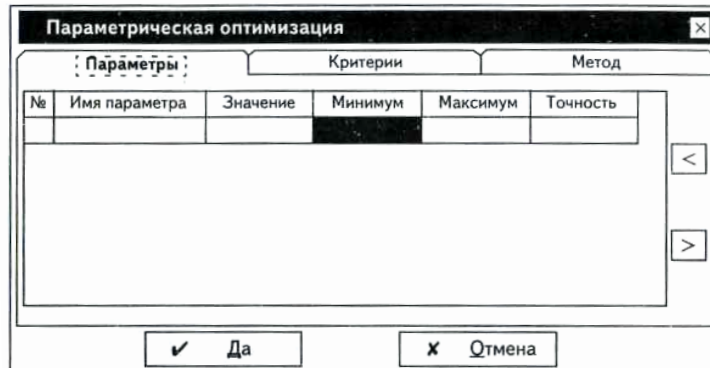


Рисунок 3.4.11. Діалогове вікно *Параметрична оптимізація*

Перемістити курсор на спеціальну кнопку в правій частині діалогового вікна із зображенням символу< і однократно клацніть лівою клавішею миші – відкриється додаткове діалогове вікно *Глобальні константи проекту* (рисунок 3.4.12).

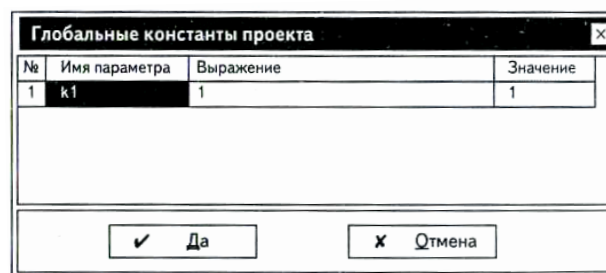


Рисунок 3.4.12. Вікно *Глобальні константи проекту*

Оскільки в розглянутому проекті тільки одна глобальна константа (параметр  $k_1 = 1$ ), то можна відразу клацнути по кнопці Так: це діалогове вікно закриється і знову з'явиться (рисунок 3.4.13) попереднє діалогове вікно, що відповідає «закладці» *Параметри* із заповненим рядком по параметрі  $k_1$ . Скорегуйте максимум для  $k_1$ , тобто введіть замість 1 число 2.

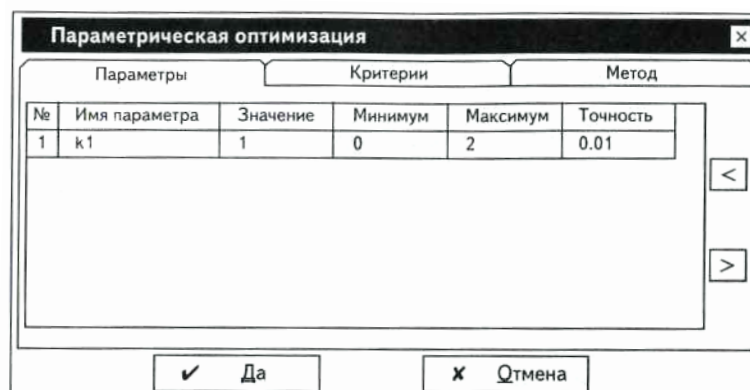


Рисунок 3.4.13. Діалогове вікно *Параметрична оптимізація*

Якби глобальних констант було, наприклад, чотири, а для рішення оптимізаційного завдання було потрібно тільки три, то в додатковому вікні глобальних констант (параметрів) необхідно спочатку вибрати зі списку необхідні параметри і тільки потім клацнути по кнопці **Так**. Подібна процедура буде виконана при виборі критеріїв оптимізації.

Перемістити курсор на «закладку» *Критерії* і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється *незаповнене* діалогове вікно для завдання *локальних* критеріїв оптимізації (аналогічно рисунок 3.4.11). Перемістити курсор на спеціальну кнопку в правій частині діалогового вікна із зображенням символу < і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється додаткове діалогове вікно критеріїв (*локальних*) оптимізацій (рисунок 3.4.14). Виділіть у вікні *Список змінних* ті змінні, які відповідають *локальним* критеріям оптимізації. Процедуру виділення виконайте в такій послідовності: перемістити курсор на рядок з ім'ям змінної, натисніть клавішу **Shift** і потім однократно клацніть *лівою* клавішею миші. Повторіть цю процедуру і для другого критерію оптимізації.

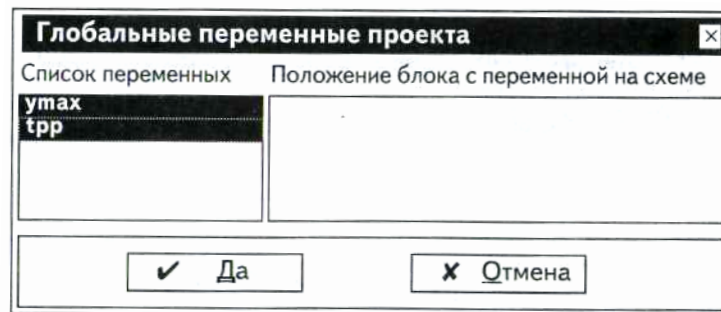


Рисунок 3.4.14. Вікно Глобальні змінні проекту

Перемістити курсор на кнопку **Так** й однократно клацніть *лівою* клавішею миші – дане додаткове діалогове вікно закриється і знову з'явиться діалогове вікно, що відповідає «закладці» *Критерії* із *заповненими* (за замовчуванням) *мінімальними* й *максимальними* значеннями кожного критерію оптимізації. Введіть значення *Мінімуму* і *Максимуму*, як це показано на рисунку 3.4.15. Значення *Максимуму* для **tpr** обмежує час перехідного процесу: **не більше 20 с**. Значення *Максимуму* для **u<sub>max</sub>** обмежує перерегулювання: **його не повинне бути**.

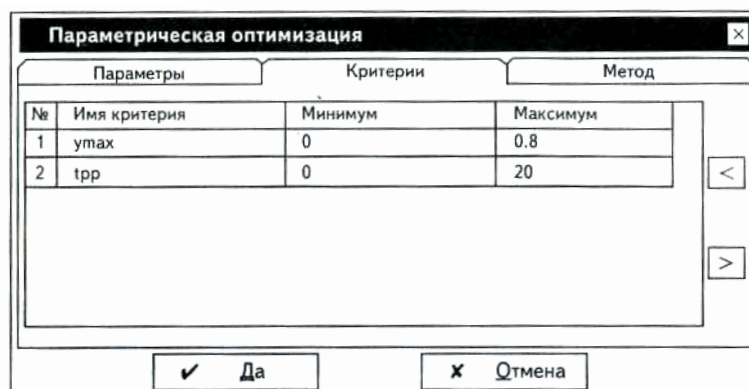


Рисунок 3.4.15. Приклад заповнення «закладки» *Критерії* вікна *Параметрична оптимізація*

Перемістити курсор на «закладку» *Метод* і клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється діалогове вікно даної закладки. Виберіть метод, максимальне число

модельовань, вид загального критерію, як це показано на рисунку 3.4.16. Метод «Пошук-2» є одним з найпростіших алгоритмів, має високу швидкість і ефективність. Максимального числа модельовань (200) цілком достатньо для пошуку оптимуму в даному завданні. Два останні діалогові рядки заповнюють тільки при використанні стохастичного методу.

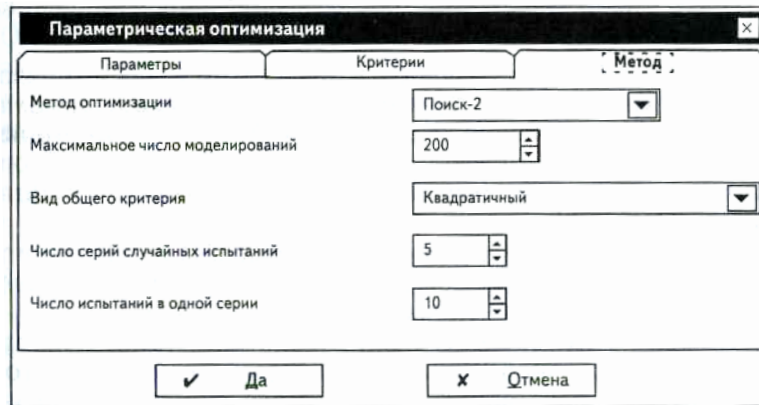


Рисунок 3.4.16. Приклад заповнення «закладки» *Метод* вікна *Параметрична оптимізація*

Перемістити курсор на кнопку **Так** і клацніть *лівою* клавішею миші. Діалогове вікно, що відповідають опції *Параметри* командного меню *Оптимізація*, закриється, і на екрані монітора знову з'явиться Головне Схемне Вікно. Відкрийте графічне вікно, запусіть завдання на рахунок і переконайтеся, що перехідний процес розбіжний. Перемістити курсор на меню *Оптимізація*, відкрийте його і виберіть опцію *Почати* – з'явиться вікно *Результати оптимізації* (рисунк 3.4.17), а у відкритому графічному вікні будуть «миготіти» графіки перехідних процесів при варіюванні  $k_1$ . Пошук завершиться питанням до вас, на який потрібно відповісти **Так**.

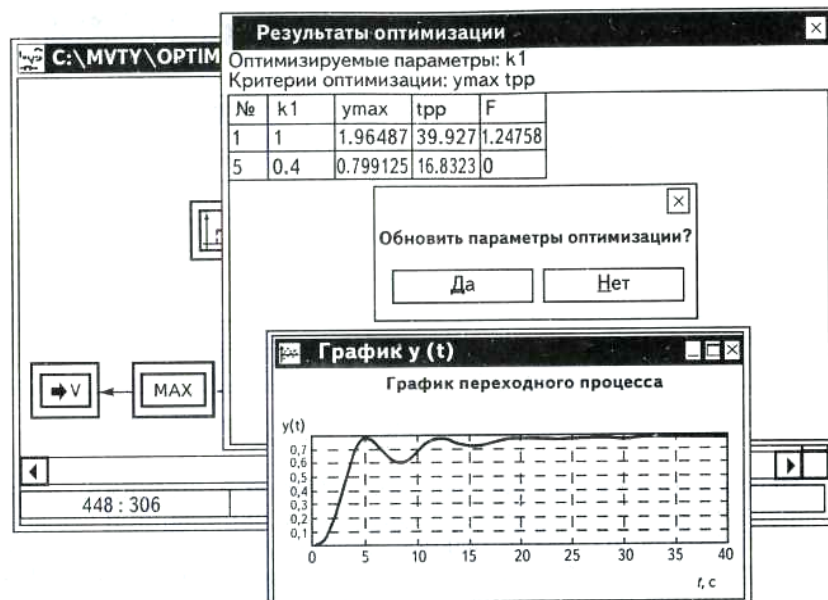


Рисунок 3.4.17. Схемне Вікно з результатами оптимізації

Зробіть активним Головне Схемне Вікно і натисніть клавішу **F8** – відкриється вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* із записом  $k_1 = 0,4$  (замість  $k_1 = 1$ ,

заданого перед оптимізацією). Це означає, що по завершенні процесу оптимізації автоматично (при обраному **Так**) перевизначене значення параметра  $k_1$ .

Запустіть завдання на розрахунок з новим значенням  $k_1$  і переконаєтеся, що перехідний процес, що вийшов, відповідає поставленим умовам й обмеженням.

**Індивідуальні завдання.** Виконайте параметричну оптимізацію скоректованої САР напруги синхронного генератора (див. лабораторну роботу 3) для одного з варіантів корекції (див. рисунок 3.3.1...3.3.6) по каналі обурюючого впливу на основі даних, наведених нижче.

**Варіант 1** (рисунок. 3.3.1). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги генератора  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу не більше 4 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметри – коефіцієнт  $k_1$  і постійна часу  $T_d$ .

**Варіант 2** (рисунок 3.3.2). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу не більше 12 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметр – постійна часу  $T_i$ .

**Варіант 3** (рисунок 3.3.3). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу не більше 6 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметри – коефіцієнт підсилення  $k_1$  і постійна часу  $T_i$ .

**Варіант 4** (рисунок 3.3.4). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу не більше 6 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметри коефіцієнт-коефіцієнт посилення  $k_1$  і постійні часу  $T_d, T_i$ .

**Варіант 5** (рисунок 3.3.5). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу 5 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметри – коефіцієнт підсилення  $k_1$  і коефіцієнт зворотного зв'язку  $k_0$ .

**Варіант 6** (рисунок 3.3.7). Вимоги до перехідного процесу: задане відхилення напруги  $|\Delta| \leq 315$  В; час перехідного процесу не більше 5 с; перерегулювання  $\sigma \leq 20$  %.

Оптимізуємі параметри – коефіцієнт передачі  $k_i$  і постійна часу  $T$  елемента, що диференціює.

Оптимізацію САР проведіть у такій послідовності:

- введіть структурну схему і вихідні дані в комп'ютер;
- задайте наступні значення вхідних впливів на систему: задаючому впливу,  $U_0 = 0$ ; східчастого обурюючого впливу  $|\Delta I| = 200 \dots 688$  А;
- виконайте всі етапи, розглянуті при оптимізації САР у демонстраційному прикладі для заданого варіанта, підключивши субмодель *Вимірник часу* до виходу системи;
- після завершення оптимізації задайте обурюючий вплив  $\Delta I$  нульове значення, а задаючого впливу  $U_0$  таке значення, при якому напруга на виході САР буде дорівнює напрузі холостого ходу  $U_{x.x.} = 6615$  В;
- задайте обурюючий вплив  $\Delta I = 200 \dots 688$  А, задаючий вплив  $U_n = 6300$  В (з урахуванням оптимальних параметрів), і одержіть перехідний процес для даного режиму роботи;
- на основі отриманого графіка перехідного процесу оцініть якість оптимальної САР по каналах задаючого і обурюючого впливів.

**Зміст звіту.** У звіті повинні бути вихідна принципова й структурна схеми оптимізованої САР, структурна схема її моделювання, графіки перехідних процесів, необхідні розрахунки і результати обробки графіків, висновки.

### **Контрольні питання й завдання**

1. Яка основна сутність інтегральних методів оцінки якості САР?

2. У яких випадках застосовують інтегральні оцінки якості САР:

$$S_1 = \int_0^{\infty} \Delta y^2 dt, \text{ або } S_1 = \int_0^{\infty} \Delta x^2 dt; S_2 = \int_0^{\infty} \left\{ \Delta y^2 + T^2 \left[ \frac{d\Delta y}{dt} \right]^2 \right\} dt,$$

або 
$$S_2 = \int_0^\infty \left\{ \Delta x^2 + T^2 \left[ \frac{d\Delta x}{dt} \right]^2 \right\} dt; S_3 = \int_0^\infty \Delta y dt, \text{ або } S_3 = \int_0^\infty \Delta x dt?$$

3. Дайте визначення оптимальної САР.
4. Що таке критерій оптимальності САР?
5. Яка сутність параметричної оптимізації САР?

## РОБОТА 5 МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ САР

### Мета роботи:

- освоїти і закріпити поняття і окремі питання теорії автоматичного регулювання нелінійних САР (нелінійні елементи і системи, релейні статичні характеристики, автоколивання в нелінійних системах);
- освоїти методику моделювання процесів регулювання в нелінійних САР за допомогою ПК «МВТУ».

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання лабораторної роботи.** Знати основні поняття і окремі питання теорії автоматичного регулювання нелінійних САР, а також функціональні можливості ПК «МВТУ» і основні етапи роботи в його середовищі (див. розділ 2, лабораторні роботи 1 і 2).

**Послідовність виконання роботи.** Для одного з розглянутих нижче варіантів нелінійної САР підготуйте вихідні дані і виконайте її моделювання відповідно до поставлених завдань для заданої системи (рисунок 3.5.1, 3.5.5; додаток В) у такій послідовності:

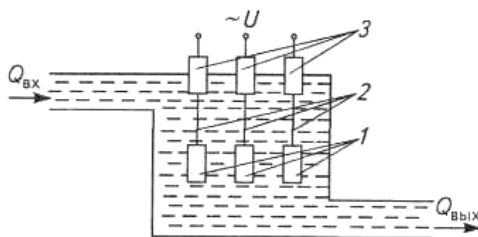


Рисунок 3.5.1 – Проточний електродний водонагрівач

1 – пластини, 2 – струмопровідні стрижні, 3 – прохідні ізолятори

- з використанням загально технічної бібліотеки (додаток А) на основі вихідної структурної схеми САР складіть її структурну схему моделювання;
- задайте максимальний і мінімальний кроки інтегрування;
- визначіть час інтегрування й число точок виводу розрахункових даних;
- задайте точність інтегрування;
- керуючись рекомендаціями розділа 2, виконаєте моделювання САР.

**САР температури проточного нагрівача.** Водонагрівач виконаний у вигляді ємності, у якій на струмопровідних стрижнях 2 (рисунок 3.5.1) і прохідних ізоляторах 3 підвішені пластини 1. До пластин через ізолятори підводиться змінна напруга. У результаті протікання струму через воду вона нагрівається. Для стабілізації температури води

водонагрівач оснащений безконтактним регулятором температури БРТ. Структурна схема САР температури показана на рисунку 3.5.2.

Передаточна функція водонагрівача по каналі регулюючого впливу [9]

$$W(p) = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1},$$

де  $k$  – передаточний коефіцієнт водонагрівача, °C/B;  $T_1, T_2$  – постійні часу, що залежать відповідно від маси електродів і маси води у водонагрівачі, с.

Значення  $k, T_1$  і  $T_2$  залежать від витрати (продуктивності) проточного водонагрівача (рисунк 3.5.3). Релейна характеристика терморегулятора показана на рисунку 3.5.4.

Варіанти завдань, складені з урахуванням графічних залежностей (рисунк 3.5.3), наведені в таблиці 3.5.1.

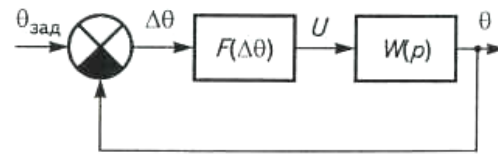


Рисунок 3.5.2. Структурна схема САР без обліку збурювань:

$\theta_{\text{зад}}$  – задана температура;  $U$  – напруга на електродах;  $\Delta\theta = \theta_{\text{зад}} - \theta$  – сигнал неузгодженості;  $W(p)$  – передаточна функція водонагрівача;  $F(\Delta\theta)$  – релейна характеристика терморегулятора

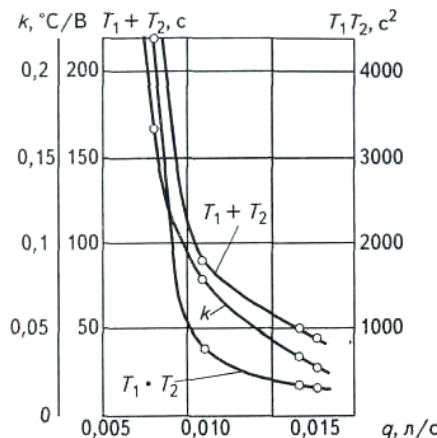


Рисунок 3.5.3. Залежності параметрів передаточної функції  $W(p)$  від продуктивності водонагрівача  $q$

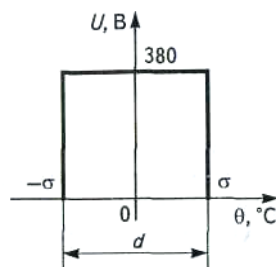


Рисунок 3.5.4. Релейна характеристика терморегулятора:  
 $d = 2\sigma$  – диференціал;  $\sigma$  – зона нечутливості

У процесі моделювання САР визначіть залежності параметрів автоколивань (амплітуди  $A$  і частоти  $\Omega$  автоколивань) від варіюючого параметра релейного регулятора – зони нечутливості регулятора  $\sigma$ . За результатами моделювання побудуйте графіки залежностей  $A = (\sigma)$  і  $\Omega = \phi(\sigma)$  і на їхній основі визначіть раціональне значення зони нечутливості а для досліджуваної системи, виходячи з показників її надійності і вимог технологічного процесу, сутність яких полягає в наступному.

Відомо, що кожен електричний комутаційний пристрій має гарантію заводом-виготовлювачем число комутацій за весь строк експлуатації, що враховують при визначенні показників надійності. Так, для магнітного пускача, що є силовим комутаційним елементом у проточному нагрівачі, гарантуюче число комутацій становить 0,5 млн. за весь термін служби.

Що стосується технологічних вимог до процесу регулювання, то вони повинні забезпечуватися відповідними показниками якості САР. Одне з технологічних вимог - точність стабілізації регульованої величини. Для автоматичної системи стабілізації температури води на виході водонагрівача допускаються відхилення температури від заданого значення в межах  $\pm 10\%$ .

### 3.5. 1. Значення параметрів елементів Системи Автоматичного Регулювання і задаючого впливу $\theta_{\text{зад}}$

| Варіант | $\sigma_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$ | $U, \text{В}$ | $k, ^\circ\text{C}/\text{В}$ | $T_1 T_2, \text{с}^2$ | $(T_1 + T_2), \text{с}$ | $\theta_{\text{зад}}, ^\circ\text{C}$ |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1       | 1,5                                   | 0,1                                   | 380           | 0,09                         | 1100                  | 120                     | 25                                    |
| 2       | 2                                     | 0,2                                   | 220           | 0,075                        | 78                    | 89                      | 20                                    |
| 3       | 3                                     | 0,2                                   | 380           | 0,12                         | 2500                  | 200                     | 18                                    |
| 4       | 2                                     | 0,3                                   | 220           | 0,1                          | 1100                  | 115                     | 22                                    |
| 5       | 1,5                                   | 0,1                                   | 380           | 0,075                        | 750                   | 87,5                    | 28                                    |
| 6       | 2                                     | 0,3                                   | 220           | 0,042                        | 410                   | 70                      | 19                                    |
| 7       | 2,5                                   | 0,5                                   | 380           | 0,094                        | 1070                  | 110                     | 25                                    |
| 8       | 1,5                                   | 0,2                                   | 220           | 0,12                         | 2500                  | 200                     | 20                                    |
| 9       | 1,8                                   | 0,3                                   | 380           | 0,0417                       | 400                   | 65                      | 24                                    |
| 10      | 3                                     | 0,4                                   | 220           | 0,092                        | 1150                  | 125                     | 30                                    |

**Система Автоматичного Регулювання висоти зрізу рослин кукурудзозбиральним комбайном.** Для стабілізації заданої висоти зрізу рослин начіпною жниваркою самохідного кукурудзозбирного комбайна розроблена гідравлічна слідкуюча система. Її принципова схема показана на рисунку 3.5. 5. Напрямок робочого руху комбайна – по позитивній осі  $X$ . Остов 1 комбайна розглядається у вигляді коливальної системи, що враховує пружні ( $Z_1, Z_2$ ) і що демпфіруючі ( $DO_1, DO_2$ ) властивості пневматичних коліс.

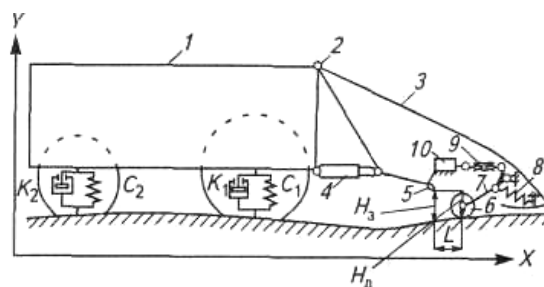


Рисунок 3.5.5. Принципова схема гідравлічної слідкуючої системи для стабілізації висоти зрізу рослин начіпною жниваркою кукурудзозбирального комбайна:

- 1 – остов комбайна; 2 – циліндричний шарнір; 3 – жниварка рядного типу; 4 – гідроциліндр;  
5 – ріжучий апарат; 6 – колесо, що копіює (датчик неузгодженості); 7 – радіальна підвіска колеса, що копіює;  
8 – пружина; 9 – регульована тяга; 10 – гідророзподільник системи, що стежить

Жниварка 3 (рядні типи) приєднана до остову комбайна за допомогою циліндричних шарнірів 2. У механізмі підйому жниварки використовуються два паралельно з'єднаних гідроциліндри 4 однобічної дії. Підйом жниварки примусовий, опускання – під дією власної ваги. Джерело енергії для слідкуючої системи - основна

гідравлічна система комбайна. Регульована величина системи – дійсна висота  $H_d$  ріжучого апарата 5 жниварки над поверхнею ґрунту. Датчик неузгодженості системи – копіююче колесо 6, шарнірно приєднане до жниварки за допомогою радіальної підвіски 7 і, що перекочується по поверхні ґрунту при русі комбайна (постійний контакт із ґрунтом забезпечується пружиною 8). Копіююче колесо розташовано на відстані  $L$  від ріжучого апарата. Воно з'єднано підоймовою-шарнірно-важільною передачею з механізмом привода золотника гідророзподільника 10, що управляє гідроциліндрами. Первісне ручне настроювання системи на задану висоту зрізу ( $H_d = H_3$ ) проводиться зміною довжини тяги 9.

Якщо висота ріжучого апарата над поверхнею ґрунту відповідає заданій, то копіююче колесо перебуває в заданому положенні щодо жниварки. Золотник гідророзподільника центральної пружини в нейтральному положенні, у якому порожнини гідроциліндрів замкнені, тому жниварка нерухома щодо остова комбайна.

На рисунку 3.5.6 показана спрощена для навчальних цілей структурна схема САР.

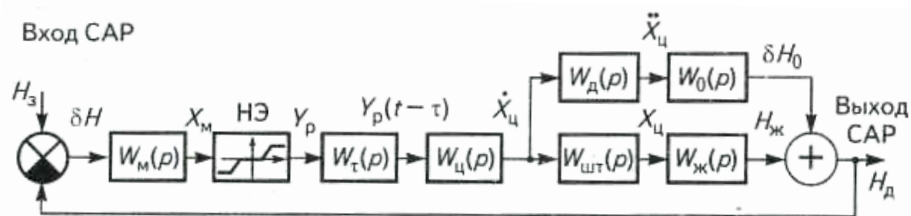


Рисунок 3.5.6. Структурна схема САР:

$W_m(p)$ ,  $W_\tau(p)$ ,  $W_\psi(p)$ ,  $W_{шт}(p)$ ,  $W_{ж}(p)$ ,  $W_d(p)$ ,  $W_0(p)$  – передаточні функції ланок системи; НЕ – нелінійний елемент;  $H_3$  – задана висота зрізу;  $\delta H$  – сигнал неузгодженості;  $X_m$  – вихідний сигнал гідророзподільника;  $Y_p$  – зміна ширини робочих вікон гідро розподільника;  $Y_p(t - \tau)$  – вихідний сигнал ланки чистого запізнювання;  $\ddot{O}_0$ ,  $\dot{O}_0$ ,  $O_0$  – переміщення, швидкість і прискорення штоків гідроциліндрів;  $\delta H_0$  – вертикальні коливання ріжучого апарата жниварки від коливань остова комбайна;  $H_{ж}$  – зміна висоти зрізу від регулюючого впливу слідкуючої системи;  $H_d$  – дійсна висота зрізу

Неузгодженість у слідкуючій системі  $\delta H$  (відхилення дійсної висоти зрізу від заданої) викликає переміщення копіюючого колеса щодо жниварки. Через підоймову-шарнірно-важільну передачу на механізм привода золотника гідророзподільника надходить сигнал  $X_m$ . Гідророзподільник управляє робочим потоком масла: для підйому жниварки масло від гідронасоса направляється до гідроциліндрів одnobічної дії (примусовий підйом), для опускання – масло з гідроциліндрів направляється на злив у бак гідросистеми (опускання під дією ваги жниварки).

Статична характеристика гідророзподільника (рисунок 3.5.7) має істотну нелінійність: «нечутливість із обмеженням» – ланка НЕ. «Нечутливість»  $\pm X_n$  обумовлена зоною нечутливості механізму привода золотника й перекриттям робочих вікон гідророзподільника. «Обмеження» –  $Y_{pmax}$  при підйомі жниварки визначено кінцевою продуктивністю гідронасоса, «обмеження» –  $Y_{pmax}$  при опусканні – перетином дросельної шайби в лінії зливу масла з гідроциліндрів. Зміна ширини робочих вікон гідророзподільника  $Y_p$ , відбувається, якщо сигнал  $X_m$  виходить за зону нечутливості  $\pm X_n$ .

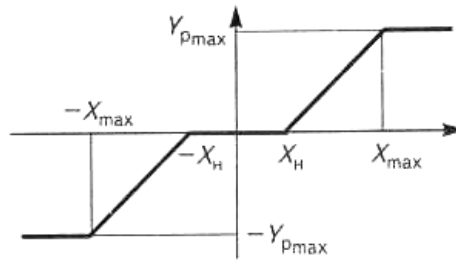


Рисунок 3.5.7. Статична характеристика гідророзподільника

Наявне запізнювання за часом передачі сигналу в гідросистемі (у зв'язку із пружними і демфірними властивостями привода, насоса, гідротрас) умовно наведені до ланки чистого запізнювання, вихідний сигнал якого  $Y_p(t - \tau)$ . Залежно від знака і величини цього сигналу виконавчий орган (гідроциліндри з наведеною масою жнивarki) здійснює регулюючий вплив, спрямований на усунення неузгодженості  $\delta H$ . Вихідний сигнал виконавчого органа – швидкість штоків гідроциліндрів  $X_{ц}$ . У результаті переміщень штоків гідроциліндрів  $X_{ц}$  відбувається поворот жнивarki щодо остова комбайна і змінюється висота зрізу  $H_{ж}$ . Зміна кутової швидкості відносного обертального руху жнивarki під дією прискорень  $\ddot{O}_0$  виконавчого органа приводить до динамічних впливів на остов комбайна, у результаті чого виникають коливання комбайна на пневматичних колесах у повздовжньо-вертикальній площині, отже, відбуваються вертикальні коливання  $\delta H_0$  ріжучого апарата жнивarki щодо поверхні ґрунту. Тому значення дійсної висоти зрізу  $H_d = H_{ж} + \delta H_0$  є результатом підсумовування регулюючих впливів системи  $H_{ж}$  і вертикальних коливань ріжучого апарата жнивarki  $\delta H_0$ , викликаних цими впливами.

Регулюючий вплив системи триває до відомості неузгодженості і величини зони нечутливості. У результаті роботи слідкуючої системи, стабілізується задане значення висоти зрізу в межах припустимих відхилень.

Передаточні функції елементів і ланок системи:

$$\begin{aligned}
 W_m(p) &= k_m && \text{– сприймаючого органа;} \\
 W_\tau(p) &= e^{-p\tau} && \text{– ланки чистого запізнювання;} \\
 W_{ц}(p) &= \frac{k_{ц}}{T_{ц}p + 1} && \text{– виконавчого органа;} \\
 W_d(p) &= p && \text{– диференційної ланки;} \\
 W_{шт}(p) &= \frac{1}{p} && \text{– інтегруючої ланки;} \\
 W_{ж}(p) &= k_{ж} && \text{– жнивarki;} \\
 W_0(p) &= \frac{k_0}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} && \text{– остова комбайна,}
 \end{aligned}$$

де  $k_m, k_{ц}, k_{ж}, k_0$  – коефіцієнти передачі ланок САР;  $T_{ц}, T_1, T_2$  – постійні часу ланок САР;  $\tau$  – час запізнювання.

Значення постійних часу  $T_1$  і  $T_2$  у передаточній функції остова комбайна залежать від пружних і демфірних властивостей пневматичних коліс (див. рисунок 3.5. 5), а також від інших конструктивних параметрів комбайна.

За допомогою комп'ютерного моделювання САР для заданого варіанта (табл. 3.5.2, 3.5.3):

- дослідити вплив коефіцієнта передачі підйомного-шарнірно-важільного механізму  $k_m$  на показники перехідного процесу при позитивних і негативних східчастих

задаючий впливах  $H_3$ , рівних  $\pm 0,05$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,15$  м;

- визначіть границю стійкості системи і виберіть раціональне значення коефіцієнта, що забезпечує необхідну якість САР;
- визначіть параметри автоколивання системи при коефіцієнтах передачі, що перевищують критичне значення.

### 3.5.2. Значення параметрів елементів і ланок Системи Автоматичного Регулювання

| Варіант | $k_M$          | $x_{max}$ , м | $x_H$ , м | $\tau$ , з | $k_0, \frac{M}{M/c}$ | $T_c$ , с |
|---------|----------------|---------------|-----------|------------|----------------------|-----------|
| 1       | 0,1...0...0,6  | 0,007         | 0,0035    | 0,05       | 25                   | 0,05      |
| 2       | 0,15...1...1   | 0,007         | 0,0035    | 0,05       | 15                   | 0,05      |
| 3       | 0,1...0...0,4  | 0,007         | 0,0035    | 0,05       | 35                   | 0,05      |
| 4       | 0,1...0...0,5  | 0,007         | 0,0035    | 0,07       | 25                   | 0,05      |
| 5       | 0,1...0...0,5  | 0,007         | 0,0035    | 0,1        | 25                   | 0,05      |
| 6       | 0,1...0...0,7  | 0,007         | 0,0035    | 0,03       | 25                   | 0,05      |
| 7       | 0,1...0...0,8  | 0,007         | 0,0035    | 0,01       | 25                   | 0,05      |
| 8       | 0,2...1...1    | 0,01          | 0,0065    | 0,05       | 25                   | 0,05      |
| 9       | 0,05...0...0,5 | 0,0045        | 0,001     | 0,05       | 25                   | 0,05      |
| 10      | 0,05...0...0,3 | 0,004         | 0,0005    | 0,05       | 25                   | 0,05      |

### 3.5.3. Параметри ланок САР

| Варіант | $k_{ж}$ | $k_0, \frac{M}{M/c^2}$ | $T_2^2, c^2$ | $T_1, c$ |
|---------|---------|------------------------|--------------|----------|
| 1...10  | 2,17    | -0,0061                | 0,002        | 0,019    |

Примітка. Значення параметрів однакові для всіх варіантів.

**Зміст звіту.** У звіт варто включити структурну схему досліджуваної САР, підготовлені вихідні дані для роботи в середовищі ПК «МВТП» (структурну схему моделювання, параметри і точність інтегрування, число точок для видачі даних), графіки процесу регулювання, графічні залежності амплітуди і частоти автоколивання для різних значень варіюючого параметра статичної характеристики нелінійного елемента, а також висновки по роботі.

#### Контрольні питання й завдання

1. Дайте визначення лінійної й нелінійної САР.
2. По якій ознаці САР підрозділяють на безперервні й релейні?
3. Що таке релейний елемент?
4. Зобразіть графічно статичну характеристику релейного елемента із зоною нечутливості.
5. Зобразіть графічно статичну характеристику релейного елемента з гістерезисом.
6. Зобразіть графічно статичну характеристику релейного елемента з гістерезисом і зоною нечутливості.
7. Що таке двопозиційні релейні САР?
8. Які рекомендації з вибору методу й параметрів інтегрування?
9. Як задають число точок видачі даних при роботі із ПК МВТУ?

## РОБОТА 6

### МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ СТАТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ У ВИГЛЯДІ АНАЛІТИЧНИХ ФУНКЦІЙ

Існують САР з елементами, статичні характеристики яких описуються нелінійними аналітичними функціональними залежностями. Такі нелінійні елементи (див. п. 1.1) лінеаризуються на основі ряду Тейлора, у результаті чого виходить наближена математична модель системи у вигляді структурної схеми лінеаризованої САР. Прикладом подібної системи може служити нелінійна САР температури в інкубаційній камері (див. рисунок 1.5, розділ 1).

У ПК «МВТП» є типові блоки *математичні Функції* і *Новий*, з використанням яких можна моделювати практично будь-яку нелінійну функціональну залежність. Наявність цих блоків дозволяє на основі ПК «МВТП» моделювати нелінійні САР безпосередньо по вихідних нелінійних моделях без попередньої лінеаризації нелінійних функціональних залежностей, що істотно підвищує вірогідність результатів їхніх досліджень.

#### Мета роботи:

- закріпити поняття і питання, що ставляться до нелінійних САР (поняття нелінійних елементів і систем, лінеаризація нелінійних статичних характеристик, поняття лінеаризована системи);
- освоїти методику моделювання нелінійних САР на основі ПК «МВТП» з використанням блоків *математичні Функції* і *Новий*.

**Теоретичний матеріал, необхідний для виконання лабораторної роботи.** Необхідно володіти поняттями, що ставляться до нелінійних систем, а також знати функціональні можливості ПК «МВТП» і основні етапи роботи в його середовищі (див. розділ 2). Крім цього варто вивчити порядок і процедури роботи із блоком *Новий* (див. додаток А).

#### Порядок виконання роботи:

- освоїти прийоми роботи із блоком *Новий* на базі демонстраційного приклада;
- по заданому варіанті самостійно підготувати вихідні дані конкретної САР і виконати її комп'ютерне моделювання.

**Демонстраційний приклад.** Для САР температури в камері інкубатора (див. п. 1.1, рисунок 1.1) як математична модель прийнята нелінійна модель у вигляді структурної схеми (див. рисунок 1.5) при наступних значеннях параметрів елементів САР:  $T_k = 1800$  с;  $k_k = 0,6$ ;  $k_0 = 0,4$ ;  $T_n = 300$  с;  $k_n = 0,1$  °С/Вт;  $T_t = 0$ ;  $k_t = 9 \cdot 10^{-5}$  В/°С;  $k_{tr} = 50$ ;  $R = 32$  Ом;  $k_v = 10 \dots 100$ .



Рисунок 3.6.1. Структурні схеми моделювання нелінійних функціональних залежностей (1.8):

*а* – за допомогою блоків *математичні Функції*; *б* – за допомогою блоку *Новий*

Вхідні східчасті впливи на систему: що задає  $U_0 = 0,02318$  В (при  $k_v = 100$ ); що обурюють  $\theta_0 = -20$  °С (при  $t = 0$ ) і  $\theta_0 = -21,5$  °С (при  $t = 30000$  с).

Нелінійність даної САР, як відзначалося в п. 1.1, обумовлена нелінійною функціональною залежністю потужності нагрівального елемента  $P_n$  від прикладеного до його

напруги  $U_n$  [див. формулу (1.8)]. Ця нелінійна функція в середовищі ПК «МВТП» із залученням блоків *математичні Функції* і *Новий* реалізується за допомогою структурних схем, показаних на рисунку 3.6.1.

Для моделювання САР на основі блоків *математичні Функції* досить володіти методикою і процедурами роботи в середовищі ПК «МВТП», які розглянуті в лабораторних роботах 1 й 2. При моделюванні нелінійних систем з використаннями блоку *Новий*, що є, по суті, універсальним інструментом для реалізації будь-яких аналітичних залежностей, крім згаданих вище методики і процедур необхідно знати особливості блоку *Новий*. Тому демонстраційний приклад побудований на основах цього блоку.

Структурна схема моделювання демонстраційної САР показана на рисунку 3.6.2.

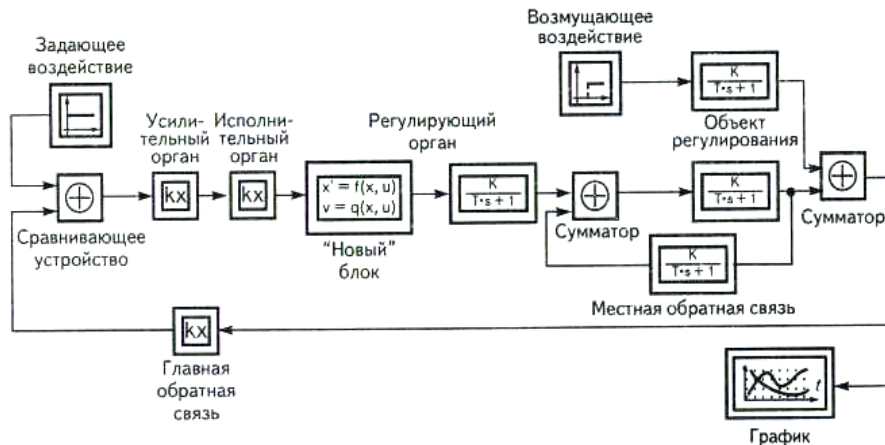


Рисунок 3.6.2. Структурна схема моделювання нелінійної САР температури в інкубаторі

Вихідні дані, необхідні для моделювання САР, з урахуванням заданих значень параметрів її елементів:

- максимальний крок інтегрування 10 с;
- мінімальний крок інтегрування 0,01 с;
- час інтегрування 50 000 с;
- число точок для видачі даних 1000;
- метод інтегрування «Адаптивний 1»;
- точність інтегрування 0,05.

**Етап 1 – робота із блоком Новий.** Після запуску ПК «МВТП» перемістити курсор на кнопку **Новий** і однократно клацніть *лівою* клавішею миші – відкриється чисте Схемне Вікно. Перемістити курсор на «закладку» *Динамічні ланки*, ініціалізуйте її, перемістити курсор на *Новий* блок, однократно клацніть *лівою* клавішею миші і перенесіть у центр Схемного Вікна *Новий* блок. У результаті виконання цих операцій Схемне Вікно прийме вид, показаний на рисунку 3.6.3.

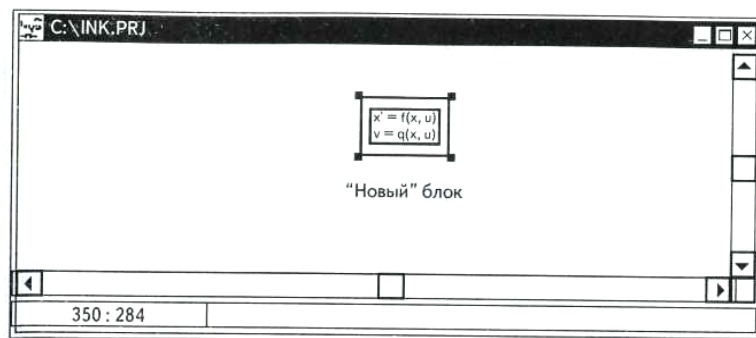


Рисунок 3.6.3. Схемне Вікно із блоком Новий

Перемістити курсор на *Новий* блок і дворазово клацніть *лівою* клавішею миші — у Схемному Вікні з'явиться вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* (рисунок 3.6.4).



Рисунок 3.6.4. Схемне Вікно з *Редактором інтерпретатора математичних функцій*

У вікні, що з'явилося, запишіть нелінійну функціональну залежність потужності (1.8) у такій послідовності:

input  $U$ ; {опис імя і розмірності вхідної величини - напруги на нагрівачі  $U$ }

$R = 32$ ; {значення константи - опору нагрівача  $R$ }

$P = U^2/R$ ; {обчислення потужності  $P$ }

Output  $P$ ; {опис імя і розмірності вихідної величини - потужності нагрівача  $P$ }

Коментарі необхідно вмістити у фігурні дужки. При записі функціональних залежностей давати коментарі не обов'язково.

Після виконання операцій запису функціональної залежності (1.8) Схемне Вікно з *Редактором інтерпретатора математичних функцій* прийме вид, «зроблений на рисунку 3.6.5.

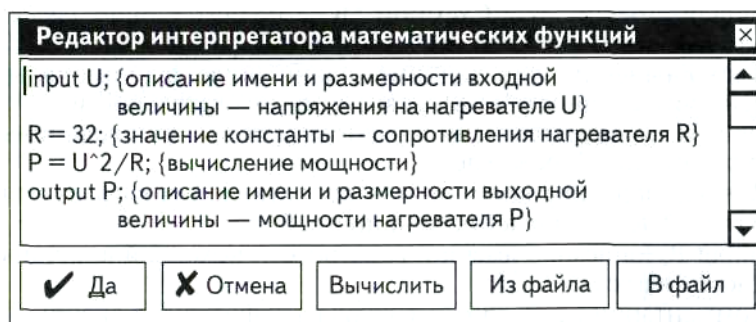


Рисунок 3.6.5. Вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* блоку *Новий*, реалізуючи функцію (1.8)

Перемістити курсор на кнопку ОК і однократно клацніть *лівою* клавішею миші — закриється вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* і відкриється Головне Схемне Вікно, у якому *Новий* блок буде мати один вхід і один вихід.

**Етап 2 – формування в Схемному Вікні структурної схеми моделювання САР** (див. рисунок 3.6.2). Використовуючи відомі процедури заповнення Схемного Вікна типовими

блоками і проведення ліній зв'язку на структурних схемах (див. лабораторну роботу 1), доповніть Схемне Вікно із блоком *Новий* (див. рисунок 3.6.3) необхідними блоками і з'єднаєте їх відповідно до вихідної структурної схеми САР (див. рисунок 3.6.2). Для наочності можна зробити відповідні написи на схемі. У результаті виконання етапу 2 Головне Схемне Вікно буде мати вигляд, показаний на рисунку 3.6.6.

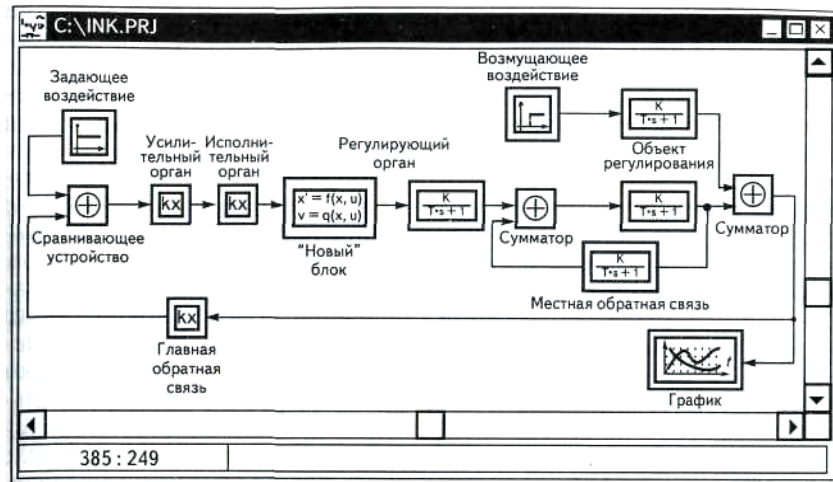


Рисунок 3.6.6. Схемне Вікно з введеною структурною схемою моделювання САР

**Етап 3 – введення параметрів структурної схеми.** Використовуючи відомі процедури установки параметрів блоків, розглянуті в лабораторній роботі 1 або 2, введіть значення параметрів передаточних функцій елементів і вхідних впливів у відповідні блоки структурної схеми моделювання САР (див. рисунок 3.6.6).

**Етап 4 – моделювання перехідного процесу САР.** Перемістити курсор на блок *Графік* і дворазово клацніть лівою клавішею миші – відкриється графічне вікно.



Рисунок 3.6.7. Графічне вікно

Перемістити курсор на командну кнопку **Продовжити** і клацніть лівою клавішею миші – ви запустили завдання на рахунок. У графічному вікні в процесі розрахунку буде відображатися графік перехідного процесу САР (див. рисунок 3.6.7). Для наочності можна зробити напис на його осях.

**Вихідні дані для виконання індивідуального завдання.** За основу при виконанні індивідуального завдання взята САР завантаження робочого органа траншейного вигрузчика силосу [6], конструкція і принцип роботи якого полягають у наступному.

Робочий орган - ланцюгово-планчатий віддільник (ЛПВ) переміщається по вертикальній прямій щоглового типу. При робочому ході (рух униз) ЛПВ фрезерує

горизонтальну поверхню силосного моноліту. Відділений корм по напрямному кожусі попадає в прийомний пристрій похилого транспортера і далі системою транспортерів подається в мобільний транспортний засіб або в потокову лінію роздачі кормів. Після досягнення крайнього нижнього положення ЛПВ піднімається над поверхнею корму і зміщається поперек траншейного сховища по порталі на ширину робочого органа. У такій послідовності вигрузчик виконує операції, поки не вибере силос по всій ширині сховища. Потім вигрузчик силосу по рейках, покладеним на бортах траншейного сховища, переміщається в глиб сховища на відстань, рівна довжині віддільника. Після цього цикл виїмки корму повторюється. Всі операції по керуванню вигрузчиком здійснює оператор зі спеціальної кабіни.

Для стабілізації завантаження робочого органа застосована САР (рисунок 3.6.8), принципи побудови і роботи якої наступні. Регулювання завантаження робочого органа (ЛПВ)  $I$  забезпечується по струму  $I$  асинхронного електродвигуна 2. Струм  $I$  контролюється за допомогою трансформаторів струму 3 і за допомогою випрямної схеми Ларіонова 4 перетворюється в напругу постійного струму  $U$ . Напруга  $U$ , щооднозначно залежить від струму  $I$ , рівняється з задаючою напругою  $U_0$ , що знімається з задаючого потенціометра 5. Сигнал неузгодженості  $\Delta U = U_0 - U$  подається на електронний підсилювач (регульований випрямляч) 6, з виходу якого напруга  $U_n$  надходить на електродвигун 7 привода переміщення ЛПВ, що працює при його переміщенні вниз у режимі динамічного гальмування.

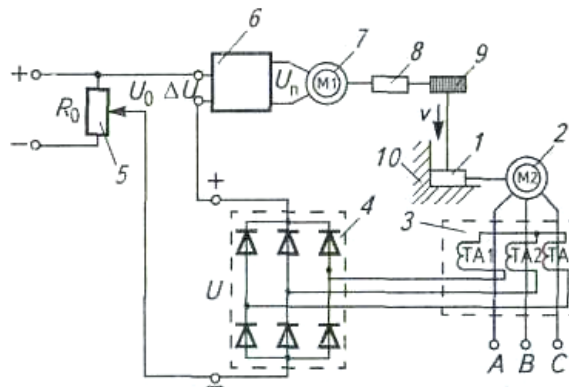


Рисунок 3.6.8. Принципова схема САР:

$I$  – робочий орган (ЛПВ); 2 – електродвигун М2 приводи ЛПВ; 3 – трансформатори струму ТА1, ТА2, ТА3; 4 – випрямна схема Ларіонова; 5 – задаючий потенціометр  $R_0$ ; 6 – регульований випрямляч; 7 – електродвигун М1 привода подачі ЛПВ; 8, 9 – відповідно редуктор і барабан привода подачі ЛПВ; 10 – силосний моноліт

При виїмці силосу із траншеї ЛПВ переміщається вниз під дією гравітаційної сили, а швидкість його переміщення (подачі)  $v$  регулюється по ланцюзі зворотного зв'язку за допомогою зміни гальмового моменту електродвигуна 7 у режимі динамічного гальмування. Таким чином, при змінах щільності силосу  $\rho$  (обурюючого впливу) по висоті сховища забезпечується стабілізація струму  $I$  у межах малих відхилень від заданого номінального значення  $I_n$ .

Функціональна схема САР показана на рисунку 3.6.9, а структурна її схема – на рисунку 3.6.10.

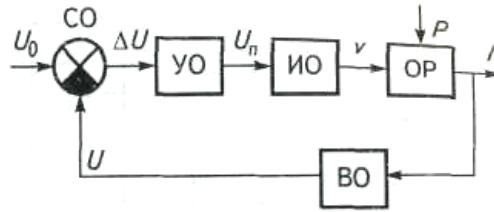


Рисунок 3.6.9. Функціональна схема САР:

ОР – об'єкт регулювання (ЛПВ разом з електродвигуном М1); В – сприймаючий орган (трансформатори струму ТА1, ТА2, ТА3 і випрямляч ВЗ; СО – дорівнюючий орган (схема порівняння сигналів  $U_0$  і  $U$ ); ПО – підсилювальний орган (регульований випрямляч б); ВО – виконавчий орган (електродвигун М1 у режимі динамічного гальмування, редуктор і барабан)

Для елементів структурної схеми на рисунку 3.6.10 передаточні функції і рівняння наступні.

Передаточна функція об'єкта регулювання по регулюючому впливі

$$W_0(p) = \frac{k_0}{T_0 p + 1},$$

де  $k_0$  – передаточний коефіцієнт, А·с/м;  $T_0$  – постійна часу, с.

Передаточна функція сприймаючого органа

$$W_B(p) = k_B,$$

де  $k_B$  – передаточний коефіцієнт, В/А.

Передаточна функція підсилювального органа

$$W_y(p) = k_y,$$

де  $k_y$  – коефіцієнт підсилення регульованого випрямляча.

Спрощене диференціальне рівняння руху виконавчого органа [6]

$$m \frac{dv}{dt} = G - F - R, \quad (3.6.1)$$

де  $m$  – приведена маса оберткових і поступально рухаючись частин, ЛПВ до обіду барабана;  $G$  – сила ваги ЛПВ;  $R$  – сила реакції моноліту корму при роботі ЛПВ;  $F$  – гальмова сила, створювана двигуном М1 у режимі динамічного гальмування.

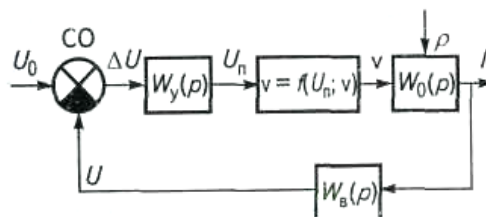


Рисунок 3.6.10. Структурна схема САР

Сила реакції силосного моноліту

$$R = k v,$$

де  $k$  – константа, що залежить від фізико-механічних властивостей силосу.

Гальмова сила

$$F = \frac{a U_n^2 v}{b^2 + v^2}, \quad (3.6.2)$$

де  $a, b$  – константи, що залежать від параметрів електродвигуна, передаточного числа редуктора й радіуса барабана.

Вирішимо нелінійне рівняння (3.6.1) відносно похідній у наступному вигляді:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}G - \frac{1}{m}F - \frac{k}{m}v.$$

Тоді виконавчий орган можна представити у вигляді структурної схеми, показаної на рисунку 3.6.11.

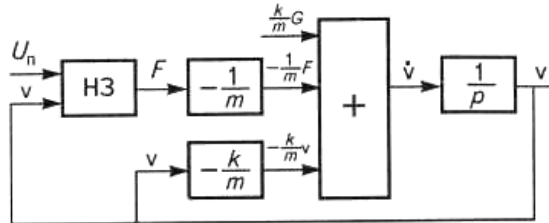


Рисунок 3.6.11. Структурна схема виконавчого органа:

НЛ – нелінійна ланка, що реалізує залежність (3.6.2)

Як показали дослідження, виконавчий орган має інвертуючі властивість: з ростом  $U_n$  швидкість  $v$  зменшується, а при зменшенні  $U_n$  – збільшується [6]. З урахуванням інвертуючих особливостей виконавчого органа і його схеми (див. рисунок 3.6.11) вихідна структурна схема САР (див. рисунок 3.6.10) прийме вид, показаний на рисунку 3.6.12.

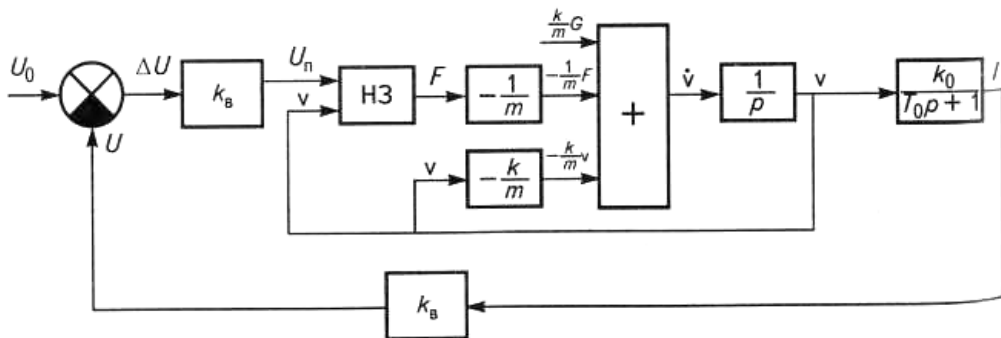


Рисунок 3.6.12. Розгорнута структурна схема САР

Дана структурна схема є основою при виконанні індивідуальних завдань із урахуванням наступних значень параметрів САР:  $T_0 = 0,003$  с;

$k_0 = 696$  А·с/м;  $k_B = 1,76$  В/А;  $k_v = 2$ ;  $m = 5760$  кг;  $G = 56\,505$  Н;  $k = 28\,300$  Н·с/м;  $a = 0,01$ ;  $b = 0,01$  м/с;  $U = 3$  В, а також при різних формах запису нелінійної залежності (6.2), зазначених у нижче наведених варіантах.

**Варіант 1.** Нелінійна ланка (НЛ) у структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується залежністю (3.6.2).

**Варіант 2.** Нелінійна ланка (НЛ) у структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{a U_n^2 v}{b^2/v + v}.$$

**Варіант 3.** Нелінійна ланка в структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{av}{b^2/U_n^2 + v^2/U_n^2}.$$

**Варіант 4.** Нелінійна ланка в структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{aU_n^2}{\left(\frac{b^2}{v^2} + 1\right)}.$$

**Варіант 5.** Нелінійна ланка в структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{U_n^2 v}{A + B v^2},$$

де  $A = 0,01$ ;  $B = 100$ .

**Варіант 6.** Нелінійна ланка в структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{C U_n^2 v}{1 + D v^2},$$

де  $C = 100$ ;  $D = 10\,000$ .

**Варіант 7.** Нелінійна ланка в структурній схемі (див. рисунок 3.6.12) описується формулою

$$F = \frac{C U_n^2}{1/v + D v},$$

де  $C = 100$ ;  $D = 10\,000$ .

**Порядок виконання індивідуального завдання.** На основі структурної схеми (рисунок 3.6.12) для заданого варіанта функціональної залежності нелінійної ланки (НЛ) підготуйте вихідні дані для комп'ютерного моделювання САР завантаження робочого органа траншейного вилучача силосу. Використовуючи додаток А, складіть структурну схему моделювання САР. Ґрунтуючись на рекомендаціях розділа 2, визначіть параметри інтегрування (крок, час інтегрування) і число точок видачі даних, задайте метод інтегрування.

За аналогією з демонстраційним прикладом виконайте комп'ютерне моделювання заданої САР і за графіком перехідного процесу оцініть її якість.

**Зміст звіту:** структурна схема САР; її структурна схема моделювання; числові дані, необхідні для роботи в середовищі ПК «МВТП»; графік перехідного процесу; результати оцінки якості системи; висновки.

### **Контрольні питання й завдання**

1. Що являє собою нелінійна САР?
2. Яка сутність лінеаризації нелінійних статичних характеристик на основі ряду Тейлора?
3. Складіть структурну схему моделювання нелінійної функціональної залежності  $y = ax^2$  з використанням блоків бібліотеки «Функції математичні» ПК «МВТП».
4. Складіть структурну схему моделювання нелінійної залежності  $y = k/x$  з використанням блоків «Функції математичні» ПК «МВТП».
5. Які призначення і можливості блоку *Новий* ПК «МВТП» при моделюванні нелінійних САР?
6. Який принцип роботи САР температури в інкубаторі?
7. Чому САР температури в інкубаторі є нелінійною?

8. Який принцип роботи САР завантаження робочого органа траншейного вигрузчика силосу?
9. Чому САР завантаження робочого органа вигрузчика силосу ставиться до класу нелінійних систем?
10. Які вихідні дані необхідні для моделювання САР у середовищі ПК «МВТУ»?

## РОБОТА 7

### МОДЕЛЮВАННЯ САР З НЕЛІНІЙНИМИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМИ РІВНЯННЯМИ

#### Мета роботи:

- освоїти поняття і окремі питання, що ставляться до теорії автоматичного регулювання нелінійних САР (поняття нелінійних динамічних ланок і систем);
- освоїти методику моделювання процесів регулювання в нелінійних САР за допомогою ПК «МВТП».

#### Послідовність виконання роботи:

- на найпростішому демонстраційному прикладі освоїти моделювання перехідного процесу нелінійної коливальної ланки за допомогою блоку *Новий* ПК «МВТП» і придбати навички самостійної роботи;
- по заданому варіанті самостійно підготувати вихідні дані для моделювання нелінійної САР висоти зрізу рослин кукурудзозбиральним комбайном і виконати на комп'ютері всі необхідні процедури.

#### Теоретичний матеріал, необхідний для виконання лабораторної роботи.

Необхідно володіти поняттями, згаданими раніше, знати функціональні можливості ПК «МВТП» і основні етапи роботи в його середовищі (див. розділ 2 і лабораторні роботи 1 і 2). Крім цього необхідно вивчити порядок і процедури роботи із блоком *Новий*, наведені в додатку А.

**Демонстраційний приклад.** Для нелінійної коливальної ланки підготуйте вихідні дані і проведіть моделювання перехідного процесу в такій послідовності:

- за допомогою блоку *Новий* ПК «МВТП» створіть динамічну модель нелінійної коливальної ланки;
- с використанням ЗАГАЛЬТЕХНІЧНОЇ бібліотеки (додаток А) на основі вихідної структурної схеми складіть структурну схему моделювання;
- задайте метод інтегрування;
- задайте максимальний і мінімальний кроки інтегрування;
- визначіть час інтегрування і число точок виводу розрахункових даних;
- задайте точність інтегрування.

При моделюванні обов'язково враховуйте рекомендації розділу 2.

Вихідні дані. Демонстраційний приклад моделювання перехідного процесу нелінійної динамічної ланки побудований стосовно до коливальної ланки зі змінним демпфіруванням коливань.

Диференціальне рівняння, що описує зв'язок вхідного і вихідного сигналів ланки:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} \left[ 1 + c y^2(t) \right] + a_0 y(t) = k u(t), \quad (3.7. 1)$$

де  $u(t)$  і  $y(t)$  – відповідно вхідний і вихідний сигнали;  $a_0, a_1, a_2, c, k$  – постійні коефіцієнти.

Демпфірування коливань змінюється пропорційно величині  

$$\left[ 1 + c y^2(t) \right].$$

Добуток  $\frac{dy(t)}{dt} y^2(t)$  обумовлює нелінійність диференціального рівняння.

Значення параметрів:  $a_0 = 1; a_1 = 0,3; a_2 = 1; c = 1; k = 1$ . Вхідний східчастий сигнал  $u(t) = 0,1 \dots 1$ .

Моделювання проводять у середовищі ПК «МВТП» за структурною схемою, показаною на рисунку 3.7.1. Формування динамічної моделі нелінійної коливальної ланки здійснюється за допомогою блоку *Новий*, що дозволяє прямо в процесі роботи створювати екземпляри блоків зі своїми оригінальними математичними моделями.



Рисунок 3.7.1. Структурна схема моделювання перехідного процесу нелінійної коливальної ланки, зображена з використанням блоків бібліотек ПК «МВТП»

Демонстраційний приклад призначений для освоєння процедур роботи із блоком *Новий*. Для виклику довідки в ПК «МВТУ» необхідно при *ініціалізованому* блоці одночасно нажати клавіші **Ctrl F1** або, установивши курсор на блок, кліком *правої* клавіші миші викликати «спливаюче» меню блоку, у якому клацнути *лівою* клавішею миші по рядку *Властивості*, а потім у вікні, що відкрилося, *клацнути* лівою клавішею миші по **кнопці Допомога**.

*Новий* блок функціонує на базі вбудованого *Інтерпретатора математичних функцій*. Діалогове вікно цього блоку фактично являє собою вікно текстового редактора, у якому користувач записує математичну модель у вигляді, близькому до природного запису. Математичний опис блоку відповідає багатомірній нелінійній динамічній системі у формі Коші:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)); \\ y(t) = g(x(t), u(t)), \end{cases}$$

де  $f(x, u)$ ,  $g(x, u)$  – відомі нелінійні функції змінні стану  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  і вхідних впливів  $(u_1, u_2, \dots, u_m)$ .

Перше з рівнянь системи може не бути. У цьому випадку блок-інтерпретатор виконує алгебраїчні перетворення вхідних величин.

Розглянемо процедуру формування математичної моделі динаміки нелінійної коливальної ланки з використанням блоку *Новий*.

Диференціальне рівняння (7.1) представимо у вигляді

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{a_1}{a_2} \frac{dy(t)}{dt} \left[ 1 + c y^2(t) \right] + \frac{a_0}{a_2} y(t) = \frac{k}{a_2} u(t). \quad (3.7.2)$$

Опис у формі Коші має вигляд

$$y(t) = x_1(t); \quad \frac{dy(t)}{dt} = x_2(t).$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t); \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= \frac{k}{a_2} u(t) - \frac{a_1}{a_2} x_2(t) [1 + cx_1^2(t)] - \frac{a_0}{a_2} x_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (3.7.3)$$

Порядок виконання. Створення динамічної моделі нелінійної коливальної ланки за допомогою блоку *Новий*, складання структурної схеми і моделювання перехідних процесів проводяться в наступній послідовності.

**Етап 1 – робота із блоком *Новий*.** Після запуску ПК «МВТУ» перемістити курсор на кнопку **Новий** і зробити однократний клік *лівою* клав'яшею миші – відкриється чисте Схемне Вікно. Перемістити курсор на «закладку» *Динамічні ланки*, ініціалізувати її, перемістити курсор на блок *Новий*, однократно клацніть *лівою* клав'яшею миші і «перенесіть» у центр Схемного Вікна блок *Новий*.

Збережіть набрану частину завдання за допомогою командного меню (*Файл, Зберегти як...*) у заданому каталозі, у файлі з оригінальним ім'ям, наприклад **koleb\_zw.prj** (що означає коливальна ланка).

У результаті виконання цих операцій Схемне Вікно прийме вид, показаний на рисунку 3.7.2.

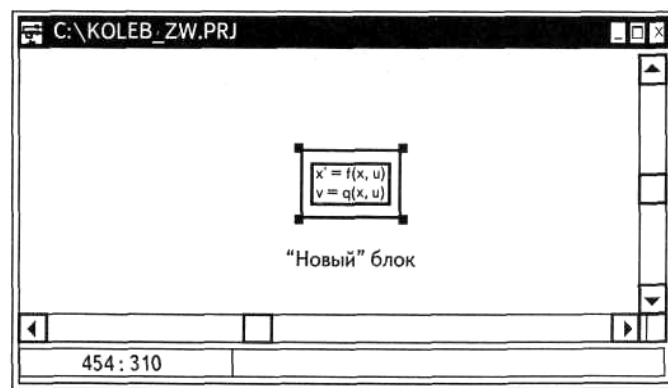


Рисунок 3.7.2. Головне Схемне Вікно із блоком *Новий*

Перемістити курсор на блок *Новий* і дворазово клацніть *лівою* клав'яшею миші – відкриється нове вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*, у якому необхідно записати диференціальні рівняння, що відповідають математичній моделі нелінійної коливальної ланки (7.3), початкові умови і значення коефіцієнтів у такій послідовності:

```
input u; {опис імя і розмірності вхідної величини}
init x1 = 0, x2 = 0; {початкові значення динамічних змінних}
a0 = 1; a1 = 0.3; a2 = 1; c = 1; k = 1; {значення коефіцієнтів}
x1' = x2; {4 і 5 рядки - диференціальні рівняння у формі Коші}
x2' = (k/a2)*u - (a1/a2)*x2(1 + c*x1^2) - (a0/a2)*x1;
output x1; {опис імя і розмірності вихідної величини}
```

При записі функціональних залежностей давати коментарі не обов'язково. Коментарі, що приводять, необхідно вмістити у фігурні дужки.

На рисунку 3.7.3 зображене вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*, де в текстовому виді задана математична модель динаміки нелінійної коливальної ланки. Формат запису очевидний з рисунка.

Перший виконуваний рядок, *обов'язково* повинен містити оператор **input**, що описує вхідні сигнали в даний блок, включаючи *ім'я* входу і його *розмірність*.

У даному прикладі *перший виконавчий рядок* (**input u;**) привласнює першому (і єдиному) входу унікальне ім'я **u**. Якби, наприклад, цей блок мав два векторних входи, причому перший вхід **u** – трижильний, а другий вхід **g** – п'ятижильний, то перший виконуваний рядок, мала б вид: **input u[3], g[5]**. Для опису розмірності використовують *прямокутні дужки*.

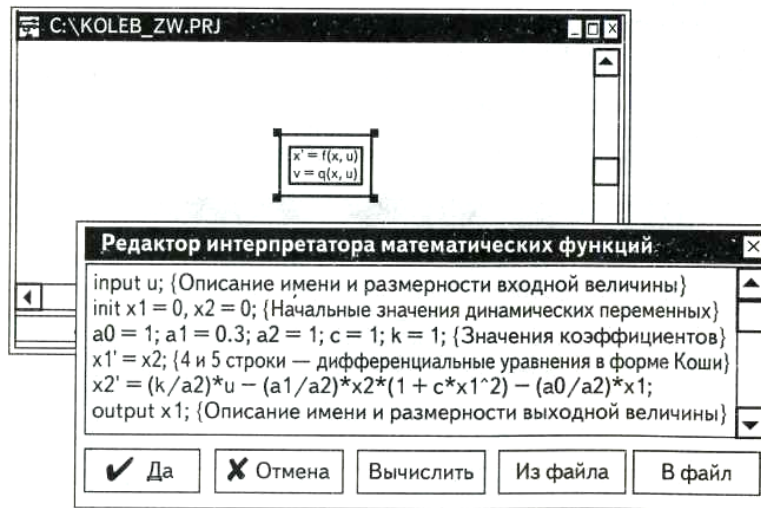


Рисунок 3.7.3. Головне Схемне Вікно з вікном *Редактор інтерпретатора математичних функцій*

Якщо блок *Новий* описує динаміку об'єкта моделювання у вигляді системи диференціальних рівнянь у формі Коші, то *другий виконавчий рядок*, *обов'язково* повинна містити оператор **init**, що описує *початкові умови динамічних змінних*, для яких далі по тексту записані звичайні диференціальні рівняння у формі Коші.

У даному прикладі *другий виконавчий рядок*, що, **init x1 = 0, x2 = 0;** задає *нульові початкові значення динамічних змінних x1 і x2*.

У *третьому виконуваному рядку* задані значення коефіцієнтів:  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = 0.3$ ;  $a_2 = 1$ ;  $c = 1$ ;  $k = 1$ ; а в *четвертому і п'ятому виконуваних рядках* – диференціальні рівняння у формі Коші, де символ апострофа позначає похідну за часом.

*Останній виконуваний рядок* блоку *Новий* з вихідними портами *обов'язково* повинна містити оператор **output**, що описує вихідні сигнали із блоку «Новий», включаючи *імена виходів їхньої розмірності*.

У цьому прикладі останній рядок (**output x1;**) описує один вихідний сигнал x1.

Після введення всього тексту у вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* перемістити курсор на кнопку **Так** і однократно клацніть *лівою клавішею миші* – вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* закриється і відкриється Головне Схемне Вікно (рисунок 3.7.4), у якому «Новий» блок буде мати *один вхід і один вихід*.

Збережіть за допомогою командного меню набрану частину завдання, однократно клацнувши *лівою клавішею миші* по кнопці **Зберегти**.

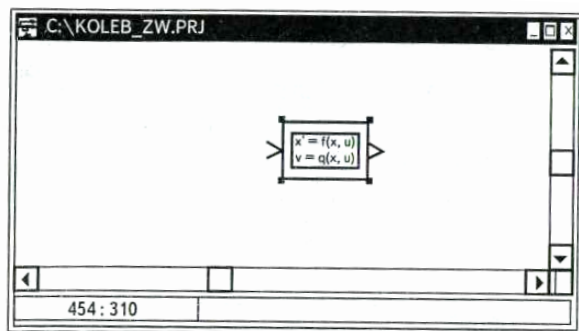


Рисунок 3.7.4. Головне Схемне Вікно із блоком *Новий* після введення математичної моделі у вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*

**Етап 2 – формування в Схемному Вікні структурної схеми моделювання** (див. рисунок 3.7.1). Використовуючи відомі процедури заповнення Схемного Вікна типовими блоками, проведення ліній зв'язку на структурних схемах (див. лабораторну роботу 1), доповніть Схемне Вікно із блоком *Новий* (рисунок 3.7.4) необхідними блоками і з'єднаєте їх відповідно до вихідної структурної схеми (рисунок 3.7.1).

Зробіть відповідні написи на схемі. У результаті виконання етапу 2 Головне Схемне Вікно повинне мати вигляд, аналогічний показаному на рисунок 3.7.5.

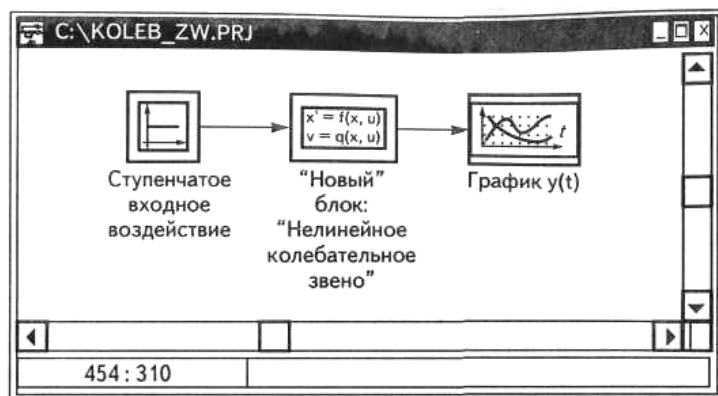


Рисунок 3.7.5. Головне Схемне Вікно з введеною структурною схемою моделювання перехідних процесів нелінійної коливальної ланки в ПК «МВТП»

Збережіть за допомогою командного меню набрану частину завдання, однократно клацнувши *лівою* кlawішею миші по кнопці **Зберегти**.

**Етап 3 – введення параметрів структурної схеми.** Використовуючи відомі процедури установки параметрів блоків, розглянуті в лабораторній роботі 1, введіть значення східчастого входного впливу 0,1 (при введенні дробова частина числа відокремлюється крапкою: 0.1).

**Етап 4 – моделювання перехідного процесу.** Перемістити курсор на блок *Графік*  $y(t)$ , дворазово клацніть *лівою* кlawішею миші – відкриється графічне вікно. Перемістити курсор на командну кнопку **Продовжити** і клацніть *лівою* кlawішею миші – ви запустили демонстраційний приклад на рахунок. У графічному вікні в процесі розрахунку буде відображатися графік перехідного процесу (рисунок 3.7.6). Зробіть написи на графіку.



Рисунок 3.7.6. Схемне Вікно із графічним вікном

Збережіть за допомогою командного меню завдання, однократно клацнувши *лівою* клавішею миші по кнопці **Зберегти**.

**Етап 5 – аналіз результатів моделювання перехідного процесу.** Проведіть моделювання перехідного процесу при інших значеннях ( $\alpha$  у діапазоні 0,1...1,0) східчастого вхідного впливу, наприклад при 0,5 і 1,0. У результаті моделювання повинні бути отримані графіки перехідних процесів, аналогічні графікам, показаним на рисунку 3.7.7.

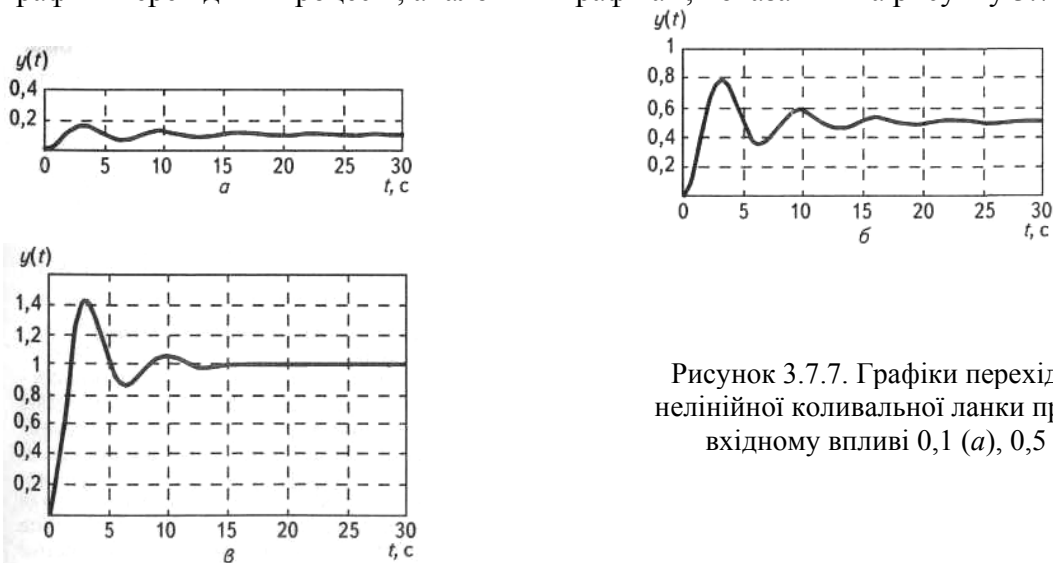


Рисунок 3.7.7. Графіки перехідних процесів нелінійної коливальної ланки при східчастому вхідному впливі 0,1 (*а*), 0,5 (*б*) і 1,0 (*в*)

Визначіть логарифмічний декремент загасання коливань (див. розділ 1) при різних значеннях східчастого вхідного впливу.

Логарифмічний декремент загасання коливань рекомендується обчислювати не по графіках перехідних процесів, а за значеннями  $y(t)$  викликавши в графічне вікно таблицю з результатами розрахунків.

Для цього **після моделювання** перехідного процесу перемістити курсор у центральну частину графічного вікна і однократно клацніть *правою* клавішею миші – з'явиться командне меню графічного вікна, у якому однократно клацніть *лівою* клавішею миші по рядку *Список*. Замість графіка з'явиться таблиця з результатами розрахунку

перехідного процесу. *Механізм прокручування* дозволяє послідовно переглянути в графічному вікні всю таблицю.

Для повернення до графіка варто повторити зазначені операції.

Визначить тенденцію зміни логарифмічного декримента загасання коливань при збільшенні східчастих входних впливів.

**Індивідуальне завдання.** Його виконують на базі САР висоти зрізу рослин кукурудзозбиральним комбайном. Відмінність цієї САР (рисунок 3.7.8) від САР, розглянутої в лабораторній роботі 5, полягає в тім, що остов комбайна **представлений** у вигляді нелінійної коливальної ланки.

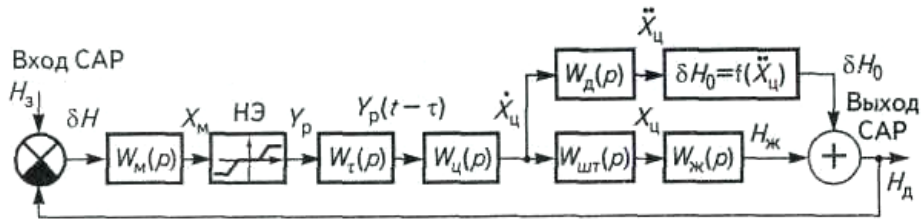


Рисунок 3.7.8. Структурна схема САР з нелінійною динамічною ланкою «Остов комбайна»:

$W_m(p)$ ,  $W_\tau(p)$ ,  $W_\psi(p)$ ,  $W_{шт}(p)$ ,  $W_{ж}(p)$ ,  $W_d(p)$  – передаточні функції ланок системи; НЕ – нелінійний елемент;  
 $\delta H_0 = f(\ddot{O}_\delta)$  – нелінійне диференціальне рівняння коливань кістяка комбайна (коливань висоти зрізу  $\delta H_0$ ) від регулюючих впливів САР;  $H_3$  і  $H_d$  – задана й дійсна висота зрізу;  $\delta H$  – сигнал неузгодженості;  
 $X_m$  – вхідний сигнал гідророзподільника;  $Y_p$  – зміна ширини робочих вікон гідророзподільника;  
 $Y_p(t - \tau)$  – вихідний сигнал ланки чистого запізнювання;  $X_\psi$ ,  $\ddot{O}_\delta$ ,  $\ddot{O}_\delta$  – переміщення, швидкість і прискорення штоків гідроциліндрів;  $H_{ж}$  – зміна висоти зрізу виконавчим органом

Диференціальне рівняння  $\delta H_0 = f(\ddot{O}_\delta)$ , що описує зв'язок вхідного і вихідного сигналів ланки «Остов комбайна», має вигляд:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + c \text{sign} \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = k u(t),$$

де  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $c$ ,  $k$  – постійні коефіцієнти, що залежать від параметрів ланки «Остов комбайна»;  $y(t) = \delta H_0(t)$  – коливання висоти зрізу  $\delta H_0$  від регулюючих впливів САР (вихідний сигнал);  $i(t) = \ddot{O}_\delta(t)$  – прискорення штоків гідроциліндрів (вхідний сигнал).

У диференціальному рівнянні, що описує динамічні властивості ланки «Остов комбайна», доданком  $c \text{sign} \frac{dy(t)}{dt}$  ураховується (додатково до моделі, розглянутої в демонстраційному прикладі) вплив сил сухого тертя (у плямі контакту коліс комбайна із ґрунтом) на демпфірування повздовжньо-кутових коливань комбайна, а отже, і коливань висоти зрізу рослин. Як відомо, сили сухого тертя спрямовані проти вектора швидкості, що визначається знаковою функцією  $\text{sign} \frac{dy(t)}{dt}$ , що обумовлює нелінійність диференціального рівняння. Коефіцієнт характеризує значення сил сухого тертя.

Значення параметрів ланки «Остов комбайна»:

$$a_0 = 1; a_1 = T_1 = 0.019; a_2 = T_2^2 = 0.002; c = 0.0006; k = k_0 = -0.0061.$$

Значення  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $k_0$  узяті з таблиці 3.5.3. Значення параметрів інших ланок САР такі ж, як у демонстраційному прикладі, розглянутому в лабораторній роботі 5.

На основі структурної схеми (рисунок 3.7.8) для заданого варіанта (див. табл. 3.5.2 і 3.5.3) підготуйте вихідні дані для комп'ютерного моделювання САР:

використовуючи додаток А, складіть структурну схему моделювання САР;

грунтуючись на рекомендаціях розділу 2, визначіть параметри інтегрування (крок і час інтегрування) і число точок видачі даних, задайте метод інтегрування.

За аналогією з демонстраційним прикладом виконайте комп'ютерне моделювання САР і за графіком перехідного процесу оцініть її якість. Дослідіть вплив коефіцієнта передачі шарнірно-важільного механізму  $k_{ш}$  на показники перехідного процесу при позитивних і негативних східчастих задаючих впливах  $H_z$ , рівних  $\pm 0,05$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,15$  м. Визначіть границю стійкості системи і виберіть раціональне значення коефіцієнта, що забезпечує необхідну якість САР. Визначіть параметри автоколиваний системи при коефіцієнтах передачі, що перевищують критичне значення.

**Зміст звіту.** У звіті повинні бути структурна схема САР; структурна схема її моделювання; математична модель нелінійної динамічної ланки у вигляді рівнянь Коші, підготовлена для запису в блок *Новий ПК «МВТУ»*; числові дані, необхідні для роботи в середовищі ПК «МВТУ»; графік перехідного процесу; результати оцінки якості системи; висновки по роботі.

**Контрольні питання й завдання**

1. Що така нелінійна динамічна ланка САР?
2. Що таке нелінійна САР?
3. Які призначення й можливості блоку *Новий ПК «МВТП»* при моделюванні нелінійних САР?
4. Складіть структурну схему моделювання перехідного процесу нелінійної динамічної ланки за допомогою блоку *Новий ПК «МВТП»*.
5. Складіть структурну схему моделювання нелінійної САР висоти зрізу рослин кукурудзозбиральним комбайном.
6. Який принцип роботи САР висоти зрізу рослин кукурудзозбиральним комбайном?
7. Чому САР висоти зрізу рослин є нелінійною?
8. Які вихідні дані необхідні для моделювання САР у середовищі ПК «МВТУ»?

## ДОДАТОК А ФРАГМЕНТИ БІБЛІОТЕК ПК МВТУ

### А.1. БІБЛІОТЕКА «ДИНАМІЧНІ ЛАНКИ»



Блок реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}.$$

Обов'язкові умови:  $m \leq n; a_n \neq 0$ .

Блок має три діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-й рядок — коефіцієнти чисельника  $b_j$ ;

в 2-й рядок — коефіцієнти знаменника  $a_i$ ;

в 3-й рядок — початкова умова  $y(0)$  (при необхідності).

**Приклад заповнення діалогового вікна:**

1-я рядок 1 0.5 2 при ( $m = 2$ )

2-я рядок 14 2 3 1 при ( $n = 4$ )

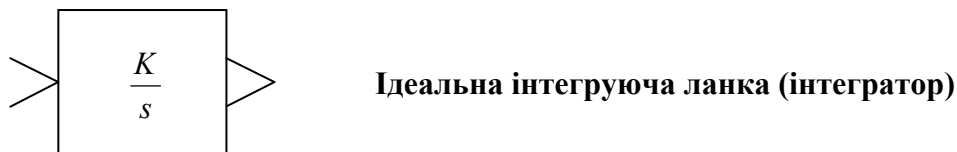
3-я рядок 2.5 (початкова умова - стаціонар)

**Примітки:**

1. Коефіцієнти  $b_j$  і  $a_i$  вводяться (через пробіл) по зростаючих ступенях  $s$ .

2. Для розв'язки алгебраїчної петлі при рівності порядків чисельника і знаменника ( $m = n$ ) передбачається, що при  $t \leq 0$  стан ланки - стаціонар.

3. Вхідний сигнал даного блоку - скалярний сигнал, що залежить від часу.



Блок векторизований і реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{K}{s}.$$

Блок має два діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати: в 1-й діалоговому рядку — вектор коефіцієнтів  $K$ ; в 2-й діалоговому рядку — вектор початкових умов  $y(0)$ .

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Скалярний вхід**

1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

**Векторний вхід** (3 однакових інтегратори)

1-я рядок 3#2.3

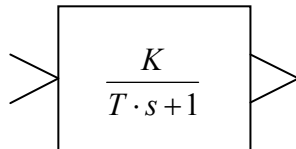
2-я рядок 3#6.5

**Векторний вхід** (3 різних інтегратори)

1-я рядок 2.3 1.8 3.3 (через пробіл)

2-я рядок 6.5 5.1 2.4 (через пробіл)

**Примітка:** за замовчуванням даний блок реалізує інтегрування скалярного вхідного сигналу.



**Аперіодична ланка першого порядку**

Блок векторизований і реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}.$$

Обов'язкова умова:  $T \neq 0$ . Блок має три діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-му діалоговому рядку — вектор коефіцієнтів  $K$ ;

в 2-му діалоговому рядку — вектор постійних часу  $T$  у секундах;

в 3-му діалоговому рядку — вектор початкових умов  $v(0)$ .

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Скалярний вхід**

1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

3-я рядок 0

**Векторний вхід** (3 однакових ланки)

1-я рядок 3#2.3

2-я рядок 3#6.5

3-я рядок 3#1

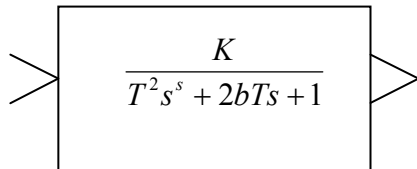
**Векторний вхід** (3 різних ланки)

1-я рядок 2.3 1.8 3.3 (через пробіл)

2-я рядок 6.5 5.1 2.4 (через пробіл)

3-я рядок 0 1.2 0.5 (через пробіл)

**Примітка:** за замовчуванням даний блок реалізує інтегрування скалярного вхідного сигналу.



**Коливальна ланка аперіодична ланка другого порядку**

Блок реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2bTs + 1}.$$

Обов'язкова умова:  $T \neq 0$ .

Блок має чотири діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-му діалоговому рядку — коефіцієнт підсилення  $K$ ;

в 2-му діалоговому рядку — постійну часу  $T$  у секундах;

в 3-му діалоговому рядку — коефіцієнт демпфірування  $b$ ;

в 4-му діалоговому рядку — початкові умови  $y(0)$  і  $dy(0)/dt$  (через пробіл).

**Приклад заповнення діалогового вікна:**

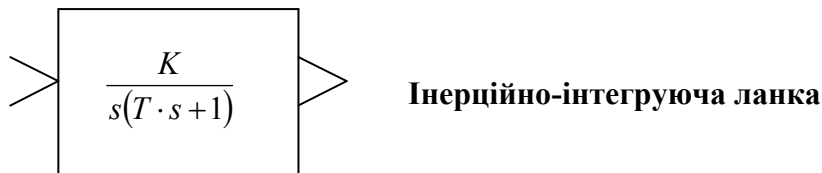
1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

3-я рядок 0.5

4-я рядок 00 (початкові умови - стаціонар)

**Примітка:** вхідний сигнал даного блоку — скалярний сигнал, що залежить від часу.



Блок реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}.$$

Обов'язкова умова:  $T \neq 0$ . Блок має три діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-му діалоговому рядку — коефіцієнт  $K$ ;

в 2-му діалоговому рядку — постійну часу  $T$  у секундах;

в 3-му діалоговому рядку — початкові умови  $Y(0)$  і  $Y'(0)$ .

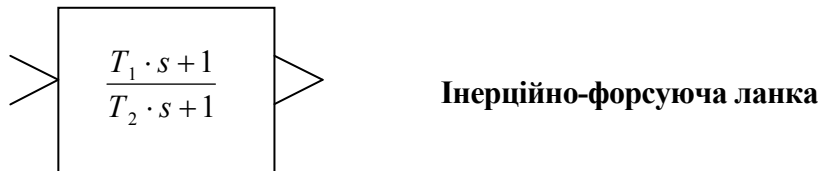
**Приклад заповнення діалогового вікна:**

1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

3-я рядок 0.5 0

**Примітка:** вхідний сигнал даного блоку — скалярний сигнал, що залежить від часу.



Блок реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}.$$

Обов'язкова умова:  $T_2 \neq 0$ .

Блок має три діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-му діалоговому рядку — постійну часу чисельника  $T_1$  у секундах;

в 2-му діалоговому рядку — постійну часу знаменника  $T_2$  у секундах;

в 3-му діалоговому рядку — початкова умова  $Y(0)$ .

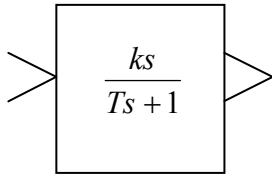
**Приклад заповнення діалогового вікна:**

1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

3-я рядок 0.5

**Примітка:** вхідний сигнал даного блоку — скалярний сигнал, що залежить від часу.



**Інерційно-диференційна ланка**

Блок реалізує передаточну функцію

$$W(s) = \frac{Ks}{Ts + 1}.$$

Обов'язкова умова:  $T \neq 0$ .

Блок має три діалогові рядки.

Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

в 1-му діалоговому рядку — коефіцієнт підсилення чисельника  $K$ ;

в 2-му діалоговому рядку — постійну часу знаменника  $T$  у секундах;

в 3-му діалоговому рядку — початкова умова  $Y(0)$ .

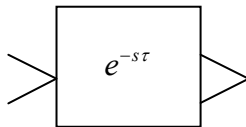
**Приклади заповнення діалогового вікна:**

1-я рядок 2.3

2-я рядок 6.5

3-я рядок 0.5

**Примітка:** вхідний сигнал даного блоку — скалярний сигнал, що залежить від часу.



**Ідеально запізнююча ланка**

Блок векторизований і реалізує наступне перетворення сигналів:

$$y(t) = x(t - T),$$

де  $x(t)$  — вектор вхідних сигналів;  $y(t)$  — вектор вихідних сигналів;

$T$  — вектор часів запізнювання.

Обов'язкова умова:  $T > 0$ .

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку необхідно задати:

у діалоговому рядку — вектор часу запізнювання  $T$  у секундах.

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Скалярний вхід**

Діалоговий рядок 2.3

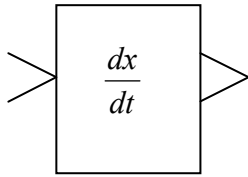
**Векторний вхід** (3 однакових ланки)

Діалоговий рядок 3#2.3

**Векторний вхід** (3 різних ланки)

Діалоговий рядок 2.3 1.8 3.3 (через пробіл)

**Примітка:** за замовчуванням даний блок реалізує перетворення скалярного вхідного сигналу.



### Диференціювання

Блок векторизований і реалізує чисельне визначення похідної на  $y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ . кожному тимчасовому кроці як відношення збільшень динамічної змінної і часу.

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи необхідно задати:

у діалоговому рядку — вектор початкових умов  $y(0)$ .

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Скалярний вхід**

Діалоговий рядок 2

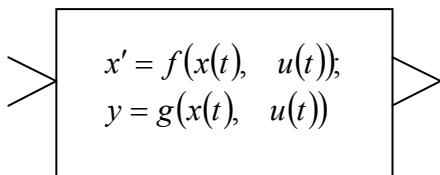
**Векторний вхід** (диференціювання 3 сигналів з однаковими початковими умовами)

Діалоговий рядок 3#2

**Векторний вхід** (диференціювання 3 сигналів з різними початковими умовами)

Діалоговий рядок 0 0 3 (через пробіл)

**Примітка:** за замовчуванням даний блок реалізує перетворення скалярного вхідного сигналу.



### «Новий» блок

З огляду на, що неможливо сформувати абсолютно повну бібліотеку типових блоків, у ПК «МВТП» розроблені засоби, які дозволяють користувачеві розширити зміст особистої бібліотеки за рахунок створення нових типів блоків, наприклад за допомогою убудованого Інтерпретатора математичних функцій, на базі якого функціонує Новий блок, що дозволяє прямо в процесі роботи створювати екземпляри блоків зі своїми оригінальними математичними моделями. Діалогове вікно цього блоку - фактично вікно текстового редактора, у якому користувач записує математичну модель у вигляді, близькому до природного запису. Математичний опис блоку відповідає багатомірній нелінійній динамічній системі у формі Коші:

$$\begin{cases} x' = f(x(t), u(t)); \\ y = g(x(t), u(t)), \end{cases}$$

де  $f(x, u)$ ,  $g(x, u)$  — відомі нелінійні функції змінні стани  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$  і вхідних впливів  $(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , причому як вхідні впливи можуть виступати і коефіцієнти (як постійні, так і змінні), що входять у кожне з рівнянь системи.

Першого з рівнянь системи може не бути, у цьому випадку блок-інтерпретатор виконує алгебраїчні перетворення вхідних величин.

Використання блока-інтерпретатора в якості функціонального досить ефективно у випадку наявності в моделі складних функціональних перетворень, коли використання для

цих цілей елементарних функціональних типових блоків приведе до невиправданого ускладнення структурної схеми.

Новий блок (блок-інтерпретатор) «розпізнає» наступні стандартні математичні операції й функції:

|   |              |             |             |            |            |               |               |
|---|--------------|-------------|-------------|------------|------------|---------------|---------------|
| + | додавання;   | <b>abs</b>  | модуль;     | <b>sin</b> | синус;     | <b>arcsin</b> | арксинус;     |
| – | вирахування; | <b>sign</b> | знак;       | <b>cos</b> | косинус;   | <b>arcos</b>  | арккосинус;   |
| * | множення;    | <b>exp</b>  | експонента; | <b>tg</b>  | тангенс;   | <b>arctg</b>  | арктангенс;   |
| / | розподіл;    | <b>ln</b>   | логарифм;   | <b>ctg</b> | котангенс; | <b>arcctg</b> | арккотангенс; |
| ^ | ступінь;     | <b>pi</b>   | 3. 1415;    | <b>e</b>   | 2. 71828;  | <b>()</b>     | дужки.        |

Додатково Новий блок «розпізнає» ряд спеціальних функцій:

**time**— модельний час;

**step** – змішаний східчастий вплив;

**sqrt** – квадратнийкорінь;

**if** – обчислення за умовою.

Наприклад, запис **u = step (t\_вкл, в\_нач, в\_кін)**; означає, що через час t\_вкл після початку моделювання змінна і змінить (стрибком) своє значення з в\_нач на в\_кін. Параметри функції step можуть бути задані як у числовому виді, так і через іменовані параметри, значення яких повинні бути визначені вище по тексту в цьому ж вікні або вікні Глобальні параметри.

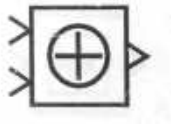
Запис **pp = if(bb, a1, a2, a3)** означає, що змінна pp приймає значення:

pp = a1, якщо іменована змінна bb < 0,

pp = a2, якщо іменована змінна bb = 0,

pp = a3, якщо іменована змінна bb > 0.

## А.2. БІБЛІОТЕКА «МАТЕМАТИЧНІ ОПЕРАЦІЇ»



**Суматор**

Блок реалізує операцію алгебраїчного підсумовування скалярних вхідних сигналів з урахуванням вагових коефіцієнтів відповідно до співвідношення:

$$y(t) = a1 \cdot x1(t) + a2 \cdot x2(t) + a3 \cdot x3(t) + \dots + aN \cdot xN(t),$$

де y(t) – вихідний сигнал; x1(t), x2(t), ..., x(t) – вхідні сигнали; a1, a2, a3, ..., aN – вагові коефіцієнти з урахуванням знаків.

Блок має один діалоговий рядок.

**Для роботи блоку необхідно задати:**

у діалоговому рядку – вагові множники для кожного із входів (вектор вагових коефіцієнтів) a1, a2, a3, ..., aN (через пробіл).

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

Звичайний порівнюючий пристрій Діалоговий рядок 1 - 1 (через пробіл)

3 входи (числове завдання вагових коефіцієнтів)

Діалоговий рядок 2 - 3 - 0.5 (через пробіл)

4 входи (змішане завдання вагових коефіцієнтів)

Діалоговий рядок 2.3 a12 - 3.3 a14 (через пробіл)

### **Примітки.**

1. За замовчуванням даний блок реалізує звичайний порівнюючий пристрій (просте вирахування сигналів).

2. При орієнтації блоку ліворуч праворуч верхній вхідний порт - для  $x_1(t)$ , нижче - для  $x_2(t)$  і т.д.

3. Іменовані коефіцієнти повинні бути задані у вікні глобальних параметрів за допомогою *Інтерпретатора математичних функцій*.

Якщо ввести в діалоговий рядок тільки один множник чисельно, наприклад 3, або символічно, наприклад А, то при закритті діалогового вікна блок *Суматор* буде мати тільки один вхід.

Якщо подати на єдиний вхід блоку скалярний сигнал, то в *Суматорі* він буде посилений в 3 або в А раз відповідно до типу завдання множника. При  $A < 0$  спочатку відбувається посилення в А раз, а потім - інвертування сигналу.

При одному вхідному порту блок частково може виконувати операції із векторними сигналами. Якщо подати на єдиний вхід блоку векторний сигнал, то в *Суматорі* елементи вектора будуть просумовані і потім сума буде посилена в 3 або в А раз відповідно до типу завдання множника. При  $A < 0$  спочатку відбувається посилення суми в А раз, а потім інвертування сигналу.



**Множення**

Блок векторизований і реалізує операцію множення векторного сигналу на скалярний сигнал:

$$y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t),$$

де  $y(t)$  - векторний вихідний сигнал;  $x_1(t)$  - векторний вхідний сигнал (1-й вхідний порт);  $x_2(t)$  - скалярний вхідний сигнал (2-й вхідний порт).

Для роботи блоку параметри не потрібні.

**Примітка:** Якщо подати на 1-й вхід блоку векторний сигнал, а на 2-й вхід блоку — скалярний сигнал, то в *Множнику* елементи 1-го вхідного сигналу будуть поелементно перемножуватися на значення 2-го вхідного сигналу.



**Розподіл**

Блок векторизований і реалізує операцію розподілу векторного сигналу на скалярний або заелементний розподіли двох векторних сигналів (однакової розмірності):

$$y(t) = x_1(t) / x_2(t),$$

де  $y(t)$  – вихідний сигнал (скалярний або векторний);  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  – вхідні сигнали (скалярні або векторні).

Обов'язкові умови:

1.  $x_2(t) \neq 0$ .
2. Розмірності вхідних векторів повинні бути однаковими.
3. Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку необхідно задати в діалоговому рядку тип другого вхідного порту: скаляр або вектор. Завдання інших параметрів не потрібно.

### **Примітка**

1. За замовчуванням даний блок реалізує простий розподіл векторного сигналу на скалярний сигнал. Якщо подати на 1-й вхід блоку векторний сигнал, а на 2-й вхід блоку скалярний сигнал (при типі другого вхідного порту скаляр), то в *Дільнику* елементи 1-го вхідного сигналу будуть поелементно розділені на значення 2-го вхідного сигналу.

2. При орієнтації блоку ліворуч праворуч верхній вхідний порт - для  $x_1(t)$ , нижче - для  $x_2(t)$ .



**Підсилювач**

Блок векторизований і реалізує функцію посилення миттєвого значення вхідного сигналу (скалярного або векторного)

$$y(t) = K \cdot x(t),$$

де  $y(t)$  – вектор вихідного сигналу;  $x(t)$  – вектор вхідного сигналу;  $K$  – коефіцієнт підсилення.

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку в діалоговому рядку необхідно задати коефіцієнт  $K$ .

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Числовий вид задання  $K$  (однакове посилення по всіх «жилах»)**

Діалоговий рядок     2.3

**Символьний вид задання  $K$  (однакове посилення по «жилах»)**

Діалоговий рядок     k1

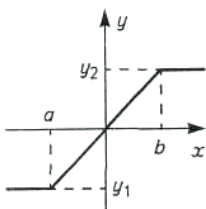
**Примітка:** за замовчуванням даний блок реалізує посилення вхідного сигналу будь-якого типу (скалярного або векторного) при  $K = 1$ .

### А.3. БІБЛОТЕКА «НЕЛІНІЙНІ ЛАНКИ»

#### Типові нелінійні ланки



**Лінійна ланка з насиченням**



Блок реалізує нелінійну статичну характеристику типу «насичення»:

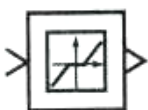
$$y(t) = K \cdot x(t), \text{ якщо } a < x(t) < b;$$

$$y(t) = y_1, \text{ якщо } x(t) \leq a;$$

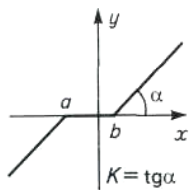
$$y(t) = y_2, \text{ якщо } x(t) \geq b,$$

$$\text{де } K = (y_2 - y_1)/(b - a).$$

Для роботи блоку необхідно задати параметри  $a$ ,  $b$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ .



**Лінійна ланка із зоною нечутливості**



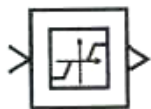
Блок реалізує нелінійну статичну характеристику по наступному алгоритмі:

$$y(t) = K \cdot [x(t) - a], \text{ якщо } x(t) < a;$$

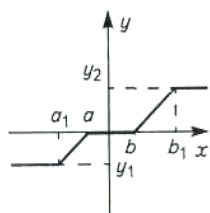
$$y(t) = 0, \text{ якщо } a \leq x(t) \leq b;$$

$$y(t) = K \cdot [x(t) - b], \text{ якщо } x(t) > b$$

Для роботи блоку необхідно задати параметри  $a$ ,  $b$  і  $K$ .



### Лінійна ланка з насиченням і зоною нечутливості



Блок реалізує нелінійну статичну характеристику по наступному алгоритмі:

$$y(t) = y_1, \text{ якщо } x(t) \leq a_1;$$

$$y(t) = K \cdot [x(t) - a], \text{ якщо } a_1 < x(t) < a;$$

$$y(t) = 0, \text{ якщо } a \leq x(t) \leq b;$$

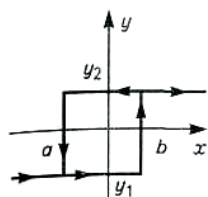
$$y(t) = K \cdot [x(t) - b], \text{ якщо } b < x(t) < b_1;$$

$$y(t) = y_2, \text{ якщо } x(t) \geq b_1.$$

Для роботи блоку необхідно задати параметри  $a_1$ ,  $a$ ,  $b_1$ ,  $b$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ .



### Релейна неоднозначна ланка



Блок реалізує нелінійну статичну характеристику типу «двопозиційне реле» по наступному алгоритмі:  $y(t) = y_1$ , якщо  $x(t) < a$ ;

$$y(t) = y(t - dt), \text{ якщо } a \leq x(t) \leq b;$$

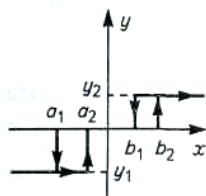
$$y(t) = y_2, \text{ якщо } x(t) > b,$$

де  $dt$  - попередній часовий крок інтегрування.

Для роботи блоку необхідно задати параметри  $a$ ,  $b$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  і початковий стан реле  $y(0)$ .



### Релейна неоднозначна ланка із зоною нечутливості



Блок реалізує нелінійну статичну характеристику типу «релейна неоднозначна із зоною нечутливості» по наступному алгоритмі:

$$y(t) = y_1, \text{ якщо } x(t) < a_1;$$

$$y(t) = 0, \text{ якщо } a_2 < x(t) < b_1;$$

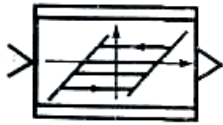
$$y(t) = y(t - dt), \text{ якщо } a_1 \leq x(t) \leq a_2,$$

$$\text{або, якщо } b_1 \leq x(t) \leq b_2;$$

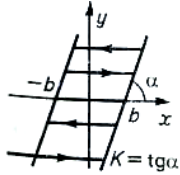
$$y(t) = y_2, \text{ якщо } x(t) > b_2,$$

де  $at$  — попередній часовий крок інтегрування.

Для роботи блоку необхідно задати параметри нелінійності  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  і початковий стан реле  $y(0)$ . При наявності «перехлеста» зон повернення процес перемикання визначається з урахуванням попереднього стану реле.



### Зазор

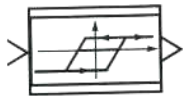


Блок реалізує нелінійну статичну характеристику типу «зазор» по наступному алгоритмі:

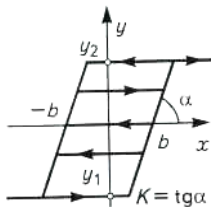
$$\begin{aligned} y(t) &= K \cdot [x(t) - b], \text{ якщо } x(t) > [y(t - dt)/K + b]; \\ y(t) &= K \cdot [x(t) + b], \text{ якщо } x(t) < [y(t - dt)/K - b]; \\ y(t) &= y(t - dt), \text{ якщо } [y(t - dt)/K - b] \leq x(t) \leq [y(t - dt)/K + b], \end{aligned}$$

де  $dt$  — попередній часовий крок інтегрування.

Для роботи блоку необхідно задати половину ширини зазору  $b$ , коефіцієнт  $K$  і початковий стан виходу  $y(0)$ .



### Осьовий зазор (люфт)



Блок реалізує нелінійну статичну характеристику типу «люфт» по наступному алгоритмі:

$$\begin{aligned} y(1) &= y_1, \text{ якщо } (1) \leq [y_1/K - b]; \\ y(t) &= y_2, \text{ якщо } x(t) > [y_2/K + b]; \\ y(t) &= K \cdot [x(t) - b], \text{ якщо } [y(t - dt)/K + b] < x(t) < [y_2/K + b]; \\ y(t) &= K \cdot [x(t) + b], \text{ якщо } [y_1/K - b] < x(t) < [y(t - dt)/K - b]; \\ y(t) &= y(t - dt), \text{ якщо } [y(t - dt)/K - b] \leq x(t) \leq [y(t - dt)/K + b], \end{aligned}$$

де  $dt$  - попередній часовий крок інтегрування.

Для роботи блоку необхідно задати половину ширини зазору  $b$ , значення параметрів насичення  $y_1$  і  $y_2$ , коефіцієнт  $K$  і початковий стан виходу  $y(0)$ .

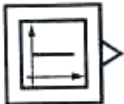
## А.4. БІБЛІОТЕКА «ДЖЕРЕЛА ВХІДНИХ СИГНАЛІВ»



### Модельний час (годинники)

Блок генерує вихідний сигнал, чисельно дорівнює поточному значенню модельного часу в секундах. Для роботи блоку параметри не потрібні.

**Примітка:** даний блок формує скалярний вихідний сигнал.

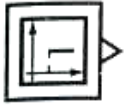


### Константа

Блок генерує постійний вихідний сигнал  $K$  (константа). Для роботи блоку необхідно задати величину сигналу  $K$  (у чисельному або символьному виді).

**Примітки:**

1. Даний блок формує скалярний вихідний сигнал.
2. Іменованний параметр  $K$  задається як глобальний за допомогою *Інтерпретатора математичних функцій*.



### Східчастий вплив

Блок генерує східчастий вихідний сигнал  $K = I(t - T)$  (зміщений стрибок положення), де  $K = (Y1 - Y0)$  - величина стрибка положення;  $Y0$  - значення сигналу до стрибка;  $Y1$  - значення сигналу після стрибка;  $T$  - час «включення» стрибка.

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку необхідно задати в діалоговому рядку - час «включення» стрибка в секундах, значення сигналів до ( $Y0$ ) і після ( $Y1$ ) стрибка (через пробіл).

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Числове завдання параметрів**

Діалоговий рядок 5 0 1 (через пробіл)

**Символьне завдання параметрів**

Діалоговий рядок T a1 a2 (через пробіл)

**Змішане завдання параметрів**

Діалоговий рядок T0 1 3 (через пробіл)

**Примітки:**

1. Даний блок формує скалярний вихідний сигнал.
2. Іменовані параметри задаються як глобальні за допомогою Інтерпретатора математичних функцій.



### Лінійний (рамний) вплив

Блок генерує лінійно наростаючий вихідний сигнал з початковим стрибком положення:

$$y(t) = a0 \cdot I(t) + alt.$$

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку необхідно задати в діалоговому рядку - коефіцієнти  $a0$  і  $a1$  (через пробіл).

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Числове завдання параметрів**

Діалоговий рядок 5 2 (через пробіл)

**Символьне завдання параметрів**

Діалоговий рядок a11 a22 (через пробіл)

**Змішане завдання параметрів**

Діалоговий рядок 5 a1 (через пробіл)

**Примітки:**

- 1- Даний блок формує скалярний вихідний сигнал.
2. Іменовані параметри задаються як глобальні за допомогою Інтерпретатора математичних функцій.



### Синусоїдальний вплив

Блок генерує синусоїдальний вихідний сигнал:  $y(t) = A \sin(\omega \cdot t + f)$ , де  $A$  – амплітуда;  $\omega$  – частота, рад/с;  $f$  – початкова фаза, рад.

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку необхідно задати в діалоговому рядку – амплітуду, частоту і початкову фазу (через пробіл).

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Числове завдання параметрів**

Діалоговий рядок 5 2 0 (через пробіл)

**Символьне завдання параметрів**

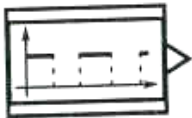
Діалоговий рядок  $A \omega \varphi$  (через пробіл)

**Змішане завдання параметрів**

Діалоговий рядок A 50  $\varphi$  (через пробіл)

**Примітки:**

1. Даний блок формує скалярний вихідний сигнал.
2. Іменовані параметри задаються як глобальні за допомогою *Інтерпретатора математичних функцій*.



**Меандр**

Блок генерує прямокутний вихідний сигнал (меандр).

Блок має один діалоговий рядок.

Для роботи блоку в діалоговому рядку необхідно задати:

Y1 - амплітуду «прямокутника» (або амплітуду «впадини»);

T1 - період «прямокутника» або «впадини» у секундах;

Y2 - амплітуду «впадини» (або амплітуду «прямокутника»);

T2 - період «впадини» або «прямокутника» у секундах.

**Приклади заповнення діалогового вікна:**

**Числове завдання параметрів**

Діалоговий рядок 5 2 0 2 (через пробіл)

**Символьне завдання параметрів**

Діалоговий рядок Y11 T11 Y12 T12 (через пробіл)

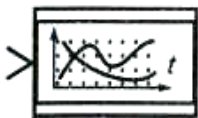
**Змішане завдання параметрів**

Діалоговий рядок 3 T21 1 T22 (через пробіл)

**Примітки:**

1. Даний блок формує скалярний вихідний сигнал.
2. Іменовані параметри задаються як глобальні за допомогою *Інтерпретатора математичних функцій*.

## **А.5. БІБЛІОТЕКА «ДАНІ»**



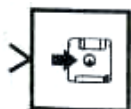
**Часовий графік**

Блок реалізує графічне відображення поточних результатів розрахунку у вигляді тимчасової залежності, фазових траєкторій у декартових або полярних координатах. Вхід - скалярний або векторний (для одночасного відображення декількох змінних використовуються різні: тип, кольори і товщина ліній).



### Фазова площина

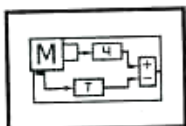
Блок реалізує графічне відображення поточних результатів розрахунку у вигляді тимчасової залежності. Вхід — скалярний або векторний (для одночасного відображення декількох змінних використовуються різні кольори ліній). Ініціалізація даного графічного вікна — дворазовим кліком лівої клавіші миші у полі блоку, автомасштабування — дворазовим кліком лівої клавіші миші у полі графіка. Кожні лінії на графіку — своя вісь ординат, що «показується» при дворазовому кліку *лівою* клавішею миші по осі. Опція курсору ініціалізується натисканням *правою* клавішею миші. Для оформлення заголовка даного вікна необхідно: виділити блок однократним кліком *лівої* клавіші миші; використовуючи меню *Стиль* і його команди, ввести заголовок, шрифт і його параметри.



### Запис у файл

Блок реалізує запис поточних результатів розрахунку у файл даних на жорсткий диск (у форматі ASCII). Вхід - скалярний або векторний. Для роботи блоку необхідно в діалоговому вікні задати ім'я файлу з розширенням (за замовчуванням .dat), тип файлу (за замовчуванням текстовий) і довжину тимчасових векторів, тобто кількість рядків у файлі даних і крок (приблизний) за часом. Наприклад: ім'я файлу mvту.dat, розмір 200#1 (200 тимчасових точок із кроком 1 с).

## А.6. БІБЛІОТЕКА «СУБСТРУКТУРИ»



### Макроблок

Блок формує «оболонку» для створення вкладеної структури, набраної як з типових блоків, так і з Макроблоків (Субмодулів) більш глибокого рівня вкладеності. Число входів і виходів даного блоку визначається автоматично при наповненні внутрішньої структури блоку типовими блоками *Порт входу* і *Порт виходу*.

Для відкриття діалогового вікна блоку перемістити курсор миші на Макроблок (Субмодуль) і однократно клацніть *правою* клавішею миші — відкриється «падаюче» меню блоку. Потім перемістити курсор миші на опцію *Властивості* і однократно клацніть *лівою* клавішею миші — відкриється діалогове вікно даного блоку.

Блок має два діалогові рядки:

*Графічне зображення блоку* — для зміни типової піктограми блоку на будь-яку оригінальну піктограму (з наявних у наявності або спеціально створеної *користувачем*);

*Редактор глобальних параметрів* — для виклику редактора глобальних параметрів *Субмоделі (Макроблоку)*, реалізованої за допомогою *Інтерпретатора математичних функцій* (ім'я Редактори — *TvarSysobject*).

Внутрішнє схемне вікно Макроблоку відкривають двома способами:

дворазовим кліком лівої клавіші миші у поле блоку;

при ініціалізованому Макроблоці натисканням клавіші PgDn.

Закриття внутрішньої структури Субмоделі (Макроблоку) виконують також двома способами:

дворазовим кліком *лівої* клавіші миші у вільному місці субмодельного Схемного Вікна; натисканням клавіші **PgUp**.



#### Порт входу

Блок векторизований організує:  
прийом даних від типових блоків і Субмоделей, зовнішніх стосовно даного Макроблоку;

передачу даних для перетворення типовими блоками (або Субмоделями) внутрішньої структури даного Макроблоку.

Порт входу автоматично визначає число входів у даний Макроблок. При закритті внутрішнього Схемного Вікна автоматично відбувається «перемальовування» зображення даного Макроблоку.

Порт входу може обробляти як скалярні, так і векторні вхідні сигнали.

Примітка. Відразу ж після переносу блоку з *Лінійки типових блоків* у Схемне Вікно рекомендується цьому блоку привласнити «унікальне» ім'я, наприклад, *Вхід № 1*.



#### Порт виходу

Блок векторизований організує:  
прийом даних від типових блоків і Субмоделей внутрішньої структури даного Макроблоку;

передачу даних для перетворення типовими блоками (Субмоделями), зовнішніми стосовно даного Макроблоку.

Порт виходу автоматично визначає число виходів з даного Макроблоку. При закритті внутрішнього Схемного Вікна автоматично відбувається «перемальовування» зображення даного Макроблоку. Порт виходу може обробляти як скалярні, так і векторні сигнали.

Примітка. Відразу ж після переносу блоку з *Лінійки типових блоків* у Схемне Вікно треба цьому блоку привласнити «унікальне» ім'я, наприклад, *Вихід № 1*.



#### Стоп-розрахунок

Блок виконує процедуру стоп-розрахунок або тимчасово перериває розрахунок при входженні значення вхідного сигналу в заданий діапазон. Блок має три діалогові рядки. Для роботи блоку в діалогових рядках необхідно задати:

у першому діалоговому рядку - текст повідомлення, якщо стоп-розрахунок;

у другому діалоговому рядку - ліву границю діапазону вхідного сигналу, при якому стоп-розрахунок;

у третьому діалоговому рядку - праву границю діапазону вхідного сигналу, при якому стоп-розрахунок.

У процесі моделювання при виникненні ситуації стоп-розрахунок з'являється спеціальне інформаційне вікно із заголовком *Зупинити розрахунок?* з повідомленням про причину виклику процедури стоп-розрахунок і кнопками ТАК, НЕМАЄ. Якщо обрано НІ, то розрахунок буде продовжений до кінцевого часу моделювання. Якщо обрано ТАК, то

розрахунок переривається і з'являється інформаційне вікно *Виникли помилки з повідомленням Помилка: Зупинка на вимогу блоку.*

#### **Приклади заповнення діалогового вікна.**

##### **Числове завдання параметрів:**

перший діалоговий рядок перевищення уставки по тиску

друга           »           »       17

третя           »           »       16,5

##### **Символьне завдання параметрів:**

перший діалоговий рядок попереджувальна уставка по періоду розгону

друга           »           »       T\_tax

третя           »           »       T\_min

##### **Змішане завдання параметрів:**

перший           діалоговий           рядок           клапан           CAP           відкривається

друга           »           »       Z\_1

третя           »           »       0,01

Примітка. 1. За замовчуванням даний блок реалізує процедуру стоп-розрахунок з параметрами діалогових рядків відповідно стоп-розрахунок, 0 і 1.

3. Іменовані параметри задаються як глобальні за допомогою Інтерпретатора математичних функцій.



#### **Замітка**

Блок фактично є сервісним і надає можливість Користувачеві виконати текстові пояснюючі повідомлення у будь-якому Схемному Вікні проекту.

Для введення текстового повідомлення необхідно:

перенести з *Лінійки типових блоків* у Схемне вікно (Головне або субмодельне) блок *Замітка*, розташувавши його на бажане місце;

виділити блок *Замітка* однократним кліком *лівою* клавішею миші;

перемістити курсор миші на текст *Замітка* і дворазово клацнути *лівою* клавішею миші — відкриється текстове вікно;

видалити текст *Замітка*, ввести необхідне текстове повідомлення і закрити текстове вікно, дворазово клацнувши *лівою* клавішею миші у вільному місці Схемного Вікна.

Тип, розмір і кольори введенного текстового повідомлення встановлюється (редагується) при виділеному блоці *Замітка* за допомогою меню *Стиль і опції Шрифт* підпису блоку.



#### **Коментар**

Блок фактично є сервісним і надає можливість Користувачеві виконати текстові пояснюючі повідомлення у спеціальному текстовому вікні.

Для введення текстового повідомлення необхідно:

перенести з *Лінійки типових блоків* у Схемне Вікно (Головне або субмодельне) блок *Коментар*, розташувавши його на бажаному місці;

перемістити курсор миші на блок *Коментар* і дворазово клацнути *лівою* клавішею миші — відкриється спеціальне текстове вікно із заголовком *Коментар до схеми*;

ввести необхідний текст, що пояснює розв'язуване завдання в середовищі ПК «МВТП»;

закрити спеціальне текстове вікно із заголовком *Коментар до схеми*, однократно клацнувши лівою клавішею миші по кнопці Так.

Підпис під блоком *Коментар* на Схемному Вікні виконати так само, як і для блоку *Замітка*, а саме:

виділити блок *Коментар* однократним кліком *лівої* клавіші миші;

перемістити курсор миші на текст *Коментар* і дворазово клацнути *лівою* клавішею миші — відкриється текстове вікно;

видалити текст *Коментар*, ввести необхідне текстове повідомлення (наприклад, *Інформація про проект*) і закрити текстове вікно, дворазово клацнувши *лівою* клавішею миші у вільному місці Схемного Вікна.

Тип, розмір і кольори введеного текстового повідомлення під блоком *Коментар* установлюють (редагують) при виділеному блоці *Коментар* за допомогою меню *Стиль і опції Шрифт* підпису блоку.

## ДОДАТОК Б

### ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ ПО ЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

#### Б.1. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРИМІЩЕННІ

Схема, показана на рисунку Б.1, являє собою систему автоматичного регулювання температури в приміщенні. Об'єктом регулювання (ОР) у такій системі є приміщення, для якого регулювана величина це температура усередині приміщення  $\theta$ , що регулює (керує) впливом температури повітря  $\theta_k$ , що надходить із калорифера, обумовлюючи вплив зміни зовнішніх факторів (у загальному випадку зміна температури атмосферного повітря, його вологості, швидкості вітру). При дослідженні системи як основного збурювання варто розглядати зміну температури навколишнього повітря.

Сприймаючим органом – СО (датчик, чутливим елементом) у даній САР є терморезистор  $R_d$ , включений у мостову схему, за допомогою резистора  $R_0$  задання необхідного значення температури в приміщенні виконуючу також функції порівнюючого органа – ПО (елемента порівняння). Посилення сигналу розбалансу  $\Delta U$  (сигналу неузгодженості) вимірювальної мостової схеми забезпечує за допомогою підсилювача. Посилений сигнал  $U$  забезпечує обертання двофазного виконавчого двигуна, що змінює переміщення клапана (заслінки) на трубопроводі подачі пара в калорифер, чим досягається зміна температури повітря вхід калорифера регулюючого впливу на об'єкті регулювання.

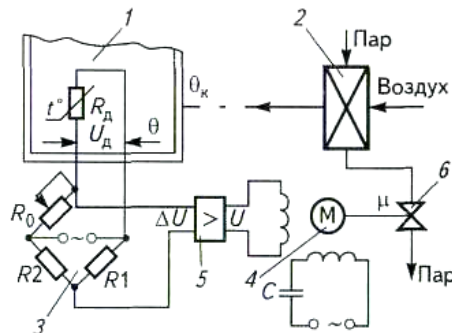


Рисунок Б.1. Схема САР температури:

1 – приміщення; 2 – теплообмінник (калорифер); 3 – вимірювальна мостова схема;  
4 – двофазний виконавчий двигун; 5 – диференціальний магнітний підсилювач;  
6 – клапан (заслінка)

Динамічні властивості об'єкта регулювання і елементів системи описуються наступними рівняннями:

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_k + k f \text{ – об'єкт регулювання;}$$

$$U_d = k_1 \theta \text{ – датчик;}$$

$$T_2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_2 U \text{ – двигун разом із клапаном;}$$

$$T_3 \frac{d\theta_k}{dt} + \theta_k = k_3 \mu \text{ – калорифер;}$$

$$\Delta U = U_0 - U_d \text{ – порівнюючий орган;}$$

$$T_4 \frac{dU}{dt} + U = k_4 \Delta U \text{ – магнітний підсилювач,}$$

де  $T_0, T_2, T_3, T_4$  – постійні часу, с;  $\theta$  – значення температури повітря в приміщенні, °C;  $\theta_k$  – значення температури повітря на виході калорифера, °C;  $k, k_1, k_2, k_3, k_4$  – коефіцієнти передачі;  $f$  – обурюючий вплив на об'єкті регулювання;  $U_d$  – спадання напруги на термодатчику, В;  $\Delta U$  – напруга на виході мостової схеми (сигнал неузгодженості), В;  $\mu$  – лінійне переміщення клапана, см;  $U_0$  – задаючий сигнал, В.

Значення параметрів елементів САР по варіантах дані в таблиці Б.1. Задане значення температури в приміщенні  $\theta = 20$  °C.

### Б.1. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_0$ , с | $T_2$ , с | $k$  | $k_1$ , В/°C | $k_4$ | $k_2$ , см/(В·с) | $f$ , °C | $k_3$ , °C/см |
|---------|-----------|-----------|------|--------------|-------|------------------|----------|---------------|
| 1       | 1000      | 0.06      | 0,2  | 0.2          | 2     | 0,002            | -11      | 10            |
| 2       | 800       | 0.07      | 0,3  | 0.3          | 4     | 0,001            | 12       | 15            |
| 3       | 900       | 0.08      | 0,25 | 0.25         | 6     | 0,0018           | -8       | 12            |
| 4       | 700       | 0.09      | 0,2  | 0.2          | 10    | 0,002            | 6        | 11            |
| 5       | 500       | 0.10      | 0,2  | 0.2          | 9     | 0,002            | -5       | 8             |
| 6       | 100       | 0.50      | 0,25 | 0.25         | 12    | 0,003            | 13       | 14            |
| 7       | 120       | 0.055     | 0,4  | 0.4          | 14    | 0,0035           | 12       | 9             |
| 8       | 200       | 0.06      | 0,4  | 0.4          | 15    | 0,0025           | -15      | 16            |
| 9       | 300       | 0.06      | 0,2  | 0.2          | 20    | 0,0016           | 17       | 13            |
| 10      | 400       | 0.08      | 0,15 | 0.15         | 10    | 0,0014           | -18      | 10            |

Примітка. Для всіх варіантів постійні часу  $T_3 = 20$  с,  $T_4 = 0,5$  с.

### Б.2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ

На рисунку Б.2 наведена схема САР температури в печі для випалу цегли. У даній системі піч являє собою об'єкт регулювання, регульованою величиною якого є температура  $\theta$  у печі, а регулюючої (керуючим) впливом – лінійне переміщення клапана  $\mu$ , від величини якого залежить кількість палива, що подається у форсунку, а отже, і кількість теплоти, виділюваної при його згорянні.

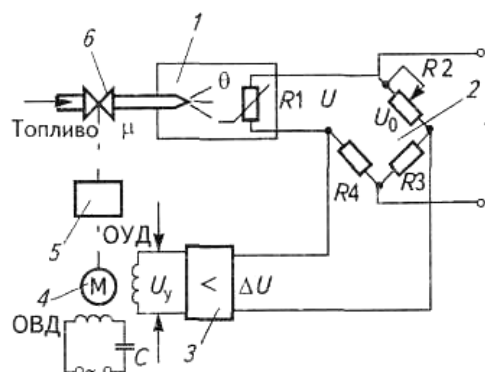


Рисунок Б.2. Схема САР:

1 – піч; 2 – вимірювальна бруківка; 3 – диференціальний магнітний підсилювач;  
4 – двофазний електродвигун; 5 – редуктор; 6 – клапан

Зовнішнім обурюючим впливом  $f$  є сукупність різноманітних факторів: вихідної вологості, температури гартованої цегли, зміни температури і вологості атмосферного повітря. При дослідженні системи можна обмежитися обліком впливу на об'єкт регулювання вихідної вологості цегли, розглядаючи її як основний обурюючий вплив.

Функції сприймаючого органа (СО) у САР виконує мідний терморезистор  $R1$ , включений у мостову схему, що забезпечує завдання необхідного значення температури в печі за допомогою резистора  $R2$ . Мостова схема також порівнює напругу  $U$ , пропорційно температурі в печі  $\theta$ , з задаючої напругою  $U_0$ , тобто вона крім функцій задаючого органа, (ЗО) виконує функції порівнюючого органа (елемента).

Напруга розбалансу мостової схеми  $\Delta U$  (сигналу неузгодженості) підсилюється підсилювачем, вихідна напруга якого управляє виконавчим двигуном. Останній через редуктор переміщається клапан, тобто змінює регулюючий вплив на вході об'єкта регулювання.

Динамічні властивості об'єкта регулювання і елементів САР описуються наступними рівняннями:

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 \mu - k_1 f - \text{об'єкт регулювання};$$

$$U = k_2 \theta - \text{датчик температури};$$

$$\Delta U = U_0 - U - \text{орган, що порівнює};$$

$$T_1 \frac{dU}{dt} + U = k_3 \Delta U - \text{диференціальний магнітний підсилювач};$$

$$T_2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U - \text{виконавчий двигун (з редуктором і клапаном)},$$

де  $T_0, T_2$ , – постійні часу, с;  $\theta$  – значення температури повітря в печі, °С;  $k, k_1, k_2, k_3, k_4$  – коефіцієнти передачі;  $\mu$  – лінійне переміщення клапана, см;  $f$  – обурюючий вплив на об'єкті регулювання;  $U$  – спадання напруги на терморезистор, В;  $\Delta U$  – сигнал розбалансу мостової схеми (сигнал неузгодженості), В;  $U_0$  – спадання напруги на задаючому резисторі В.

Значення параметрів САР по варіантах зазначені в таблиці Б.2. Задане значення температури в печі 950 °С.

## Б.2. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_0$ , с | $k_0$ , °С/см | $k_1$ , °С/% | $k_2$ , В/град | $k_3$ | $T_2$ , с | $k_4$ , см/(В с) | $f$ , % | $T_1$ , с |
|---------|-----------|---------------|--------------|----------------|-------|-----------|------------------|---------|-----------|
| 1       | 2,0       | 50            | 12           | 0,8            | 5     | 0,050     | 0,02             | 50      | 0,06      |
| 2       | 1,8       | 45            | 15           | 0,9            | 4     | 0,040     | 0,03             | -60     | 0,06      |
| 3       | 1,7       | 40            | 20           | 1,0            | 3     | 0,030     | 0,01             | 70      | 0,06      |
| 4       | 1,6       | 35            | 9            | 0,5            | 5     | 0,020     | 0,1              | -60     | 0,06      |
| 5       | 1,5       | 30            | 10           | 0,4            | 6     | 0,015     | 0,08             | 60      | 0,06      |
| 6       | 1,4       | 25            | 7            | 0,3            | 7     | 0,016     | 0,09             | -50     | 0,06      |
| 7       | 1,3       | 20            | 8            | 0,1            | 5     | 0,017     | 0,07             | 50      | 0,06      |
| 8       | 1,2       | 15            | 13           | 1,2            | 4     | 0,022     | 0,01             | -45     | 0,06      |
| 9       | 5,0       | 10            | 14           | 1,3            | 2     | 0,024     | 0,02             | 50      | 0,06      |
| 10      | 4,5       | 10            | 15           | 1,4            | 2     | 0,026     | 0,01             | 45      | 0,06      |

### Б.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Схема САР, наведена на рисунку Б.3, забезпечує стабілізацію кутової швидкості електродвигуна постійного струму, що разом з робочим механізмом є об'єктом регулювання. Регульована величина об'єкта – кутова швидкість двигуна  $\omega$ , регулюючий вплив – напруга  $U_r$  від генератора на якір двигуна. Обурюючий вплив на об'єкті регулювання – момент *опору*  $M_c$ , створюваний робочим механізмом. Кутова швидкість двигуна контролюється тахогенератором, сигнал якого  $U_{тг}$ , пропорційний швидкості, рівняється із задаючим сигналом  $U_3$ . Сигнал неузгодженості  $\Delta U = U_3 - U_{тг}$  підсилюється магнітним підсилювачем і впливає на обмотку збудження генератора, що виконує функції виконавчого органа (елемента).

Динамічні властивості об'єкта регулювання і елементів САР описуються наступними рівняннями:

$$T_d \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_d U_r - k_m M_c - \text{об'єкт регулювання};$$

$$U_{тг} = k_{тг} \omega - \text{датчик (сприймаючий орган)};$$

$$\Delta U = U_3 - U_{тг} - \text{порівнюючий орган};$$

$$T_y \frac{dU}{dt} + U = k_y \Delta U - \text{магнітний підсилювач (підсилювальний орган)};$$

$$T_r \frac{dU_r}{dt} + U_r = k_r U - \text{генератор},$$

де  $T_d$ ,  $T_y$ ,  $T_r$  – постійні часу, с;  $k_d$ ,  $k_m$ ,  $k_{тг}$ ,  $k_y$ ,  $k_r$  – коефіцієнти передачі відповідних елементів систем.

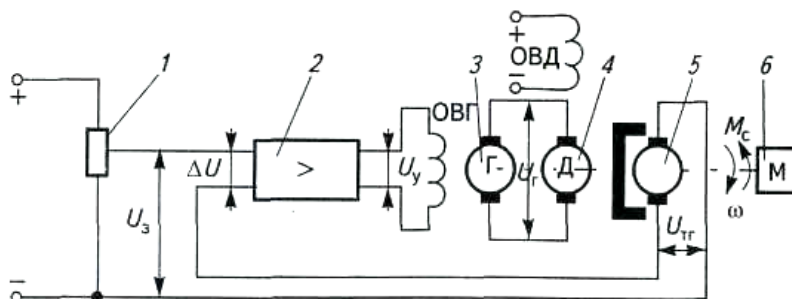


Рисунок Б.3. Схема САР кутової швидкості електродвигуна:

1 – задаючий потенціометр; 2 – магнітний підсилювач; 3 – генератор; 4 – двигун; 5 – тахогенератор;  
6 – робочий механізм

Значення параметрів об'єкта регулювання і елементів системи для різних варіантів зазначені в таблиці Б. 3. Задане значення кутової швидкості  $\omega = 40$  рад/с.

#### Б.3. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_y$ , с | $k_y$ | $k_r$ | $T_r$ , с | $k_d$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}}$ | $T_d$ , с | $k_m$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}}$ | $M_c$ , Н·м | $k_{тг}$ , $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ |
|---------|-----------|-------|-------|-----------|------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| 1       | 0,020     | 4,0   | 2,0   | 0,10      | 1,0                                                  | 0,50      | 0,02                                                                | 50          | 1,0                                                     |
| 2       | 0,015     | 5,0   | 1,8   | 0,12      | 0,95                                                 | 0,60      | 0,03                                                                | 60          | 0,9                                                     |
| 3       | 0,018     | 4,5   | 1,7   | 0,15      | 0,85                                                 | 0,70      | 0,04                                                                | 70          | 0,8                                                     |
| 4       | 0,022     | 6,0   | 1,5   | 0,20      | 0,8                                                  | 0,80      | 0,05                                                                | 80          | 0,7                                                     |
| 5       | 0,020     | 5,8   | 1,6   | 0,16      | 1,5                                                  | 0,65      | 0,06                                                                | 90          | 0,6                                                     |
| 6       | 0,025     | 4,2   | 2,0   | 0,25      | 1,4                                                  | 0,75      | 0,07                                                                | 1000        | 0,5                                                     |
| 7       | 0,020     | 3,5   | 2,7   | 0,22      | 1,3                                                  | 0,80      | 0,08                                                                | 80          | 0,4                                                     |

|    |       |     |     |      |      |      |       |    |     |
|----|-------|-----|-----|------|------|------|-------|----|-----|
| 8  | 0,028 | 6,2 | 2,1 | 0,30 | 1,2  | 0,75 | 0,02  | 90 | 0,5 |
| 9  | 0,018 | 6,5 | 2,3 | 0,16 | 1,0  | 0,50 | 0,013 | 60 | 0,6 |
| 10 | 0,014 | 7,0 | 2,5 | 0,20 | 1,25 | 0,80 | 0,015 | 70 | 0,7 |

#### Б.4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ЗЕРНОСУШАРКИ

На рисунку Б.4 показана схема САР температури теплоносія, що надходить у шахтну зерносушарку 1 з камери змішування 2, що є об'єктом регулювання. У цій камері холодне повітря при температурі  $\theta_x$  змішується з гарячим повітрям температурою  $\theta_r$ . Співвідношення гарячого й холодного повітря, отже температура повітря в камері змішування  $\theta_c$  залежать від кута повороту  $\varphi$  заслонки 3. Температура теплоносія на вході зерносушарки вимірюється терморезистором  $R_d$ , включеним у мостову схему, що не тільки забезпечує  $R_0$  необхідну температуру, але й порівнює напругу  $U_d$ , пропорційно температурі  $\theta_c$ , з задаючою напругою  $U_0$  (мостова схема одночасно виконує функції задаючих і сприймаючих органів).

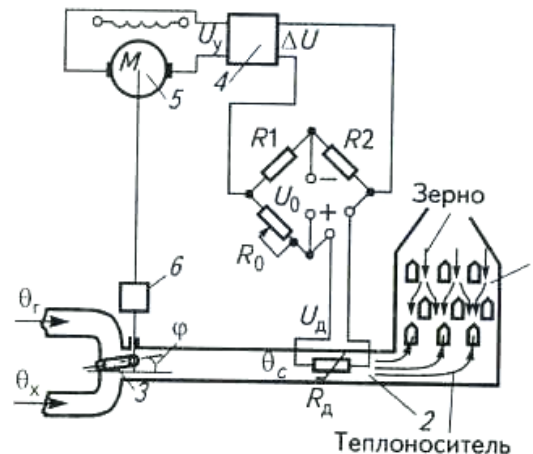


Рисунок Б.4.Схема САР температури теплоносія, що надходить у зерносушарку

Сигнал розбалансу мостової схеми (сигнал неузгодженості)  $\Delta U = U_0 - U_d$  підсилюється підсилювачем 4, вихідна напруга якого  $U_y$  керує виконавчим двигуном 5. Останній через редуктор 6 переміщує заслінку 3, тим самим змінює величину регулюючого впливу  $\varphi$  на вході об'єкта регулювання. За рахунок відповідної зміни кута повороту заслінки компенсується негативний вплив зовнішніх збурювань  $f$  (зміна температури, вологості атмосферного повітря й ін.) діючих на об'єкт регулювання. При дослідженні САР як головне збурювання варто розглядати зміну температури атмосферного повітря, прийнявши умовно, що його вологість не міняється.

Динаміка елементів даної САР описується наступними рівняннями:

$$T_c \frac{d\theta_c}{dt} + \theta_c = k_c \varphi + k_f f \quad - \quad \text{камера змішування};$$

$$T_d \frac{dU_d}{dt} + U_d = k_d \theta_c \quad - \quad \text{датчик температури};$$

$$\Delta U = U_0 - U_d \quad - \quad \text{елемент, що порівнює};$$

$$U_y = k_y \Delta U \quad - \quad \text{підсилювач};$$

$$T_m T_y \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + T_m \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d \varphi}{dt} = k_e U \quad - \quad \text{електродвигун разом зредуктором (за умови, що момент опору на валу двигуна } M_c = \text{const}),$$

де  $T_c, T_d, T_m, T_y$  – постійні часу, з;  $k_c, k_f, k_d, k_v, k_a$  – коефіцієнти передачі.

Розмірність і значення змінних по варіантах дані в таблиці Б.4. Задана температура теплоносія  $\theta_c = 120^\circ \text{C}$ .

#### Б.4. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_c, \text{с}$ | $k_c, ^\circ\text{C}/\text{рад}$ | $k_f$ | $T_d$ | $k_d, \text{В}/^\circ\text{C}$ | $T_m, \text{с}$ | $T_y, \text{с}$ | $k_y$ | $f, ^\circ\text{C}$ | $k_a, \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$ |
|---------|-----------------|----------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-------|---------------------|---------------------------------------------------|
| 1       | 2,0             | 50                               | 0,3   | 2,0   | 0,015                          | 0,015           | 0,002           | 50    | -10                 | 0,05                                              |
| 2       | 1,8             | 45                               | 0,4   | 1,5   | 0,015                          | 0,016           | 0,005           | 60    | 15                  | 0,05                                              |
| 3       | 1,4             | 40                               | 0,5   | 3,0   | 0,015                          | 0,018           | 0,003           | 70    | -20                 | 0,05                                              |
| 4       | 1,1             | 30                               | 0,3   | 2,5   | 0,015                          | 0,02            | 0,004           | 80    | 12                  | 0,05                                              |
| 5       | 1,0             | 55                               | 0,45  | 4,0   | 0,015                          | 0,015           | 0,005           | 90    | -14                 | 0,05                                              |
| 6       | 1,3             | 60                               | 0,28  | 1,3   | 0,015                          | 0,018           | 0,002           | 100   | 20                  | 0,05                                              |
| 7       | 0,8             | 45                               | 0,5   | 1,1   | 0,015                          | 0,02            | 0,003           | 80    | -10                 | 0,05                                              |
| 8       | 0,9             | 38                               | 0,4   | 1,7   | 0,015                          | 0,01            | 0,004           | 85    | 15                  | 0,05                                              |
| 9       | 1,4             | 50                               | 0,3   | 1,8   | 0,015                          | 0,212           | 0,005           | 70    | -20                 | 0,05                                              |
| 10      | 1,7             | 55                               | 0,45  | 1,9   | 0,015                          | 0,014           | 0,002           | 75    | 10                  | 0,05                                              |

#### Б.5. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИНХРОНОГО ГЕНЕРАТОРА

На рисунку Б.5 наведена схема САР частоти  $f$  ЕДС синхронного генератора 1, як приводна машина якого використовується дизельний двигун 2. У даній системі об'єктом регулювання є дизельний двигун, регульована величина якого – кутова швидкість  $\omega$ , однозначно визначальну частоту  $f$ . Регулювання кутової швидкості дизеля забезпечується переміщенням  $X_p$  рейки 3 паливні насоси 4. При переміщенні рейки вниз кількість палива, що подається в дизель, зменшується, що приводить до зниження кутової швидкості. Переміщення Рейки нагору викликає зворотний ефект. Зовнішнім збурюванням, що викликає зміну кутової швидкості  $\omega$ , є момент опору на валу дизеля, значення якого пропорційно струму навантаження генератора.

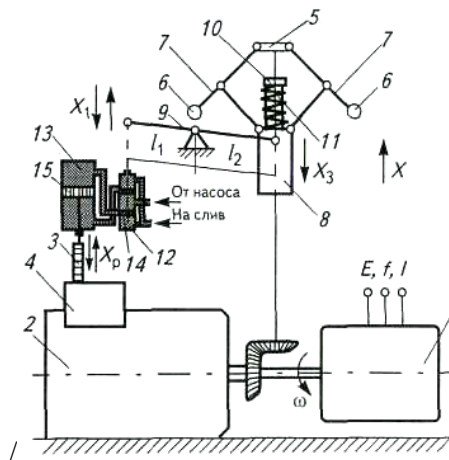


Рисунок Б.5. Схема САР частоти ЕДС синхронний генератора

Кутова швидкість контролюється за допомогою відцентрового маятника 5, вантажі 6 якого за рахунок відцентрових сил, пропорційних  $\omega$ , переміщують через систему важелів 7, втулку 8, шарнірно пов'язану з важелем 9. Важіль 9 зчленований із золотником 12, що управляє потоком масла під тиском, подаючи його у верхню або нижню порожнину виконавчого гідроциліндра 13. Зі збільшенням швидкості  $\omega$  вантажі 6 піднімаються, важіль 9 зміщує вниз плунжер 14 золотника 12. При цьому масло від насоса подається у верхню порожнину гідроциліндра 13, поршень 15 якого разом з рейкою 3 переміщується вниз, зменшуючи кількість палива, що подається в дизель. У результаті цього швидкість знижується до заданого значення. При зниженні швидкості  $\omega$  втулка 8 під дією сили ваги вантажів і пружини 11 переміщується вниз. У результаті цього важіль 9 зміщує плунжер 14 золотника 12 нагору, забезпечуючи доступ масла в нижню порожнину циліндра 13 як наслідок, переміщення рейки 3 нагору на збільшення кількості палива, що подається у двигун. Внаслідок цього швидкість  $\omega$  збільшується до заданого значення.

Відцентровий маятник у даної САР виконує функції сприймаючого, задаючого і порівнюючого органів. Він перетворює кутову швидкість  $\omega$  у переміщення  $X$  втулки 8. Це переміщення рівняється з попереднім переміщенням  $X_3$  втулки 8, що забезпечується силою пружини 11 при завданні необхідного значення кутової швидкості гвинтом 10, що дозволяє змінювати силу стиску пружини 11. У такий спосіб досягається порівняння двох величин як  $\Delta X = X_3 - X$ . Результуюче переміщення  $\Delta X$  є не що інше, як сигнал неузгодженості, що через важіль 9, золотник 12 і гідроциліндр 13 керує рейкою 3 паливних насосів 4.

Динаміка елементів САР описується наступною системою рівнянь:

$$T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X_p - k_1 \Delta I \quad - \quad \text{дизельний двигун};$$

$$T_1^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + X = k_0 X_p - k_1 \Delta I \quad - \quad \begin{array}{l} \text{відцентровий маятник як} \\ \text{орган}; \end{array} \quad \text{сприймаючий}$$

$$\Delta X = X_3 - X \quad - \quad \text{порівнюючий орган};$$

$$X_1 = k_p \Delta X \quad - \quad \text{важіль (підсилювальний орган)};$$

$$\frac{dX_p}{dt} = k_n X_1 \quad - \quad \begin{array}{l} \text{гідроциліндр із гідрозолотником і рейкою} \\ \text{насоса (виконавчий орган)}. \end{array} \quad \text{паливного}$$

Фізичний зміст змінних, входних у рівняння, представлений вище в описі схеми САР. Параметри  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  й  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_v$ ,  $k_p$ ,  $k_n$  – відповідно постійні часу і передаточні коефіцієнти. Коефіцієнт передачі важеля можна трактувати як коефіцієнт підсилення, величина якого визначається відношенням  $k_p = l_1/l_2$ .

Розмірності параметрів і їхні значення по варіантах зазначені в таблиці Б.5. Задане значення кутової швидкості  $\omega = 50$  рад/с.

#### Б.5. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_0$ , с | $k_0$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{мм}}$ | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $k_1$ , рад/(с·А) | $k_v$ , $\frac{\text{мм} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ | $k_p$ | $\Delta I$ | $k_n$ , 1/с |
|---------|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------------------------------|-------|------------|-------------|
| 1       | 0,8       | 17                                                    | 0,04      | 0,06      | 0,5               | 0,01                                                  | 12    | 18         | 5           |
| 2       | 0,7       | 14                                                    | 0,038     | 0,055     | 0,5               | 0,01                                                  | 10    | -20        | 4           |
| 3       | 0,6       | 11                                                    | 0,032     | 0,045     | 0,5               | 0,01                                                  | 14    | 15         | 9           |
| 4       | 0,5       | 18                                                    | 0,022     | 0,037     | 0,5               | 0,01                                                  | 13    | 18         | 8           |
| 5       | 1,2       | 17                                                    | 0,015     | 0,033     | 0,5               | 0,01                                                  | 11    | -13        | 5           |
| 6       | 1,6       | 16                                                    | 0,01      | 0,021     | 0,5               | 0,01                                                  | 15    | 17         | 3,5         |
| 7       | 1,4       | 13                                                    | 0,03      | 0,05      | 0,5               | 0,01                                                  | 12    | -15        | 5,2         |
| 8       | 1,2       | 15                                                    | 0,025     | 0,04      | 0,5               | 0,01                                                  | 10    | 22         | 4           |
| 9       | 0,8       | 20                                                    | 0,02      | 0,06      | 0,5               | 0,01                                                  | 8     | 18         | 5           |
| 10      | 1,5       | 19                                                    | 0,04      | 0,09      | 0,5               | 0,01                                                  | 13    | -30        | 7           |

## Б.6. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЦІ

На рисунку Б.6 показана схема САР температури повітря  $\theta_v$  у теплиці. Обігрів теплиці забезпечується нагрітою водою, що проходить через труби 1, температура якої  $\theta_t$  залежить від співвідношення гарячої і підігрітої води. Це співвідношення, у свою чергу, залежить від прохідного перетину електрокеруючого клапана 2, що однозначно визначається значенням лінійного переміщення  $X$  заслонки клапана.

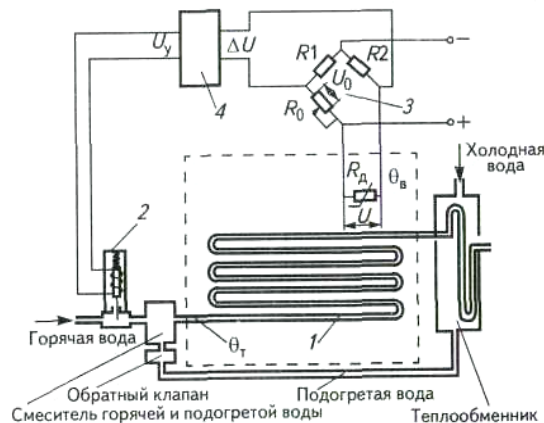


Рисунок Б.6. Схема САР температури повітря в теплиці

Температура повітря  $\theta_v$  у теплиці вимірюється терморезистором  $R_d$ , включеним у мостову схему 3, що за допомогою резистора  $R_0$  задає необхідне значення температури в атмосфері теплиці. За допомогою мостової схеми також рівняється напруга  $U$ , пропорційно температурі  $\theta_v$  з задаючою напругою  $U_0$  тобто мостова схема одночасно виконує задаючі і сприймаючі Функції органів (елементів).

Сигнал розбалансу мостової схеми (сигнал неузгодженості)  $\Delta U = U_0 - U_d$  підсилюється електронним підсилювачем 4, вихідна напруга  $U_y$  яким керує електромагнітний клапан 2. За рахунок відповідної зміни переміщення  $X$  заслонки клапана і забезпечується зміна температури води  $\theta_t$ .

Як об'єкт регулювання в даній системі доцільно розглядати приміщення теплиці разом з нагрівальними трубами. У такому випадку регулюючим впливом на вході об'єкта буде температура води  $\theta_t$  за допомогою зміни якої компенсуються відхилення температури повітря  $\theta_v$  у теплиці, що виникають внаслідок зміни зовнішніх обурюючих впливів (температури і вологості атмосферного повітря, сонячної радіації, швидкості і напрямки вітру й ін.). При дослідженні САР як головне збурювання варто розглядати зміни температури атмосферного повітря, прийнявши умовно, що всі інші обурюючі фактори постійні.

Динаміка елементів САР описується наступною системою рівнянь:

$$T_2^2 \frac{d^2 \theta_v}{dt^2} + T_1 \frac{d \theta_v}{dt} + \theta_v = k_0 \theta_t (t - \tau) * + kf \quad - \text{об'єкт регулювання};$$

$U = k_d \theta_v$  – датчик температури (без обліку його постійної часу, тому що вона на два порядки менше постійної часу об'єкта регулювання);

$\Delta U = U_0 - U$  – порівнювальний орган;

$U_y = k_y \Delta U$  – електронний підсилювач;

$X = k_e U_y$  – електрокеруєми клапан (без обліку електромеханічних перехідних процесів у клапані);

$\theta_t = k_c X$  – змішувач гарячої і підігрітої води.

Фізична сутність змінних, входних у рівняння, представлена вище в описі схеми САР. Параметри  $T_1$ ,  $T_2$  й  $k_0$ ,  $k$ ,  $k_d$ ,  $k_y$ ,  $k_e$ ,  $k_c$  – відповідно постійні часу і коефіцієнти передачі;  $\tau$  – тимчасове запізнювання, що залежить від швидкості води (продуктивності циркуляційного насоса) і конструктивних розмірів системи обігріву.

Розмірності параметрів і їхнє значення по варіантах дані в таблиці

Б. 6. Задана температура повітря в теплиці  $\theta_b = 25^\circ\text{C}$ .

#### Б.6. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $\tau$ , с | $k_0$ | $k_d$ , В/°C | $k_y$ | $k_z$ , мм/В | $k_c$ , °C/мм | $k$ | $f$ , °C |
|---------|-----------|-----------|------------|-------|--------------|-------|--------------|---------------|-----|----------|
| 1       | 600       | 1440      | 360        | 0,3   | 0,02         | 90    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | 15       |
| 2       | 550       | 1210      | 300        | 0,3   | 0,02         | 80    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | -20      |
| 3       | 500       | 1200      | 240        | 0,3   | 0,02         | 70    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | 12       |
| 4       | 650       | 1560      | 400        | 0,3   | 0,02         | 60    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | -14      |
| 5       | 520       | 1248      | 350        | 0,3   | 0,02         | 50    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | -20      |
| 6       | 610       | 1464      | 380        | 0,3   | 0,02         | 46    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | 10       |
| 7       | 530       | 1272      | 350        | 0,3   | 0,02         | 110   | 0,4          | 0,8           | 0,2 | 15       |
| 8       | 700       | 1680      | 400        | 0,3   | 0,02         | 100   | 0,4          | 0,8           | 0,2 | -20      |
| 9       | 650       | 1560      | 420        | 0,3   | 0,02         | 55    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | -10      |
| 10      | 640       | 1536      | 400        | 0,3   | 0,02         | 65    | 0,4          | 0,8           | 0,2 | 15       |

\* Зображення по Лапласу запізнілої функції  $\theta_t = \theta_t(t - \tau)$  при нульових початкових умовах  $\theta_t(t - \tau) \rightarrow \theta_t(p)e^{-\tau p}$ .

#### Б.7. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ, ЩО ПОДАЄТЬСЯ В ЗЕРНОСУШАРКУ

На рисунку Б.7 наведена САР температури  $\theta$  повітря, що подається в зерносушарку із системи підігріву, що включає в себе теплогенератор 1 з форсункою 2 для розпилення рідкого палива й трубопроводи 3 і 4 для змішування повітря і топкових газів. Температура повітря  $\theta$  контролюється датчиком температури – терморезистором  $R_d$  включеним у мостову схему 5, що за допомогою резистора  $R_0$  задає необхідне значення температури повітря, що подається в зерносушарку. За допомогою мостової схеми також рівняється напруга  $U$ , пропорційне температурі  $\theta$ , з задаючою напругою  $U$  (мостова схема одночасно виконує задаючі і порівнюючі функції органів). Сигнал розбалансу мостової схеми (сигнал неузгодженості)  $\Delta U = U_0 - U_d$  підсилюється електронним підсилювачем 6, вихідна напруга якого  $U_y$  керує заслонкою 7 за допомогою електромагнітної 8. За рахунок відповідної зміни переміщення  $X$  заслонки забезпечується зміна кількості палива  $q$ , що спалює в камері згоряння 9 теплогенератора. Тим самим регулюється температура повітря  $\theta$ .

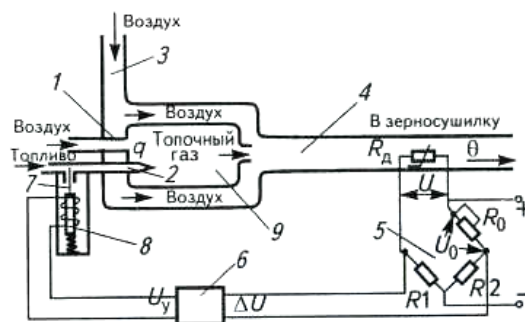


Рисунок Б.7. Схема САР температури повітря, що подається в зерносушарку

Об'єктом регулювання в даній системі є теплогенератор, що регулює вплив – кількість палива  $q$ , подаваного в камеру згоряння, а обурюючий вплив - зміна температури і вологості атмосферного повітря. При дослідженні САР як обурюючий вплив варто розглядати зміну температури атмосферного повітря  $\theta_a$ , прийнявши умовно, що його вологість постійна.

Динаміка елементів САР описується наступною системою рівнянь:

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 q(t - \tau) + k_b \theta_a \quad - \text{об'єкт регулювання};$$

$$T_d = \frac{dU}{dt} + U = k_d \theta \quad - \text{датчик температури};$$

\*Зображення по Лапласу запізнілої функції  $q(t - \tau)$  при нульових початкових умовах  $q(t - \tau) \rightarrow q(p)e^{-\tau p}$ .

$\Delta U = U_0 - U$  – порівнюючий орган;

$U_y = k_y y$  – електронний підсилювач;

$X = k_3 U_y$  – заслонка і електромагніт без обліку електромеханічних перехідних процесів (спрощене рівняння);

$q = k_\phi X$  – форсунка,

Розмірності параметрів і їхнє значення по варіантах дані в таблиці Б.7. Задане значення температури повітря  $\theta = 120^\circ\text{C}$ .

Фізична сутність змінних, вхідних у рівняння, представлена вище в описі схеми САР. Параметри  $T_0$ ,  $T_d$  і  $k_0$ ,  $k_b$ ,  $k_d$ ,  $k_y$ ,  $k_3$ ,  $k_\phi$  – відповідно постійні часу і передаточні коефіцієнти;  $\tau$  - час запізнювання.

### Б.7. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_0$ , с | $k_0$ , $\frac{^\circ\text{C} \cdot \text{с}}{\text{г}}$ | $\tau$ , с | $k_b$ | $T_d$ , с | $k_d$ , В/ $^\circ\text{C}$ | $k_y$ | $k_3$ , мм/В | $k_\phi$ , г/(с· мм) | $\theta_a$ , $^\circ\text{C}$ |
|---------|-----------|----------------------------------------------------------|------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|--------------|----------------------|-------------------------------|
| 1       | 200       | 1,25                                                     | 10         | 0,3   | 20        | 0,025                       | 60    | 0,35         | 2                    | 25                            |
| 2       | 210       | 1,1                                                      | 15         | 0,3   | 21        | 0,025                       | 85    | 0,35         | 2                    | -30                           |
| 3       | 220       | 1,2                                                      | 16         | 0,3   | 22        | 0,025                       | 70    | 0,35         | 2                    | 20                            |
| 4       | 230       | 1,3                                                      | 17         | 0,3   | 23        | 0,025                       | 80    | 0,35         | 2                    | -15                           |
| 5       | 240       | 1,5                                                      | 18         | 0,3   | 24        | 0,025                       | 90    | 0,35         | 2                    | 22                            |
| 6       | 250       | 1,1                                                      | 19         | 0,3   | 25        | 0,025                       | 100   | 0,35         | 2                    | -27                           |
| 7       | 200       | 1,2                                                      | 10         | 0,3   | 20        | 0,025                       | 105   | 0,35         | 2                    | 18                            |
| 8       | 230       | 1,3                                                      | 20         | 0,3   | 23        | 0,025                       | 90    | 0,35         | 2                    | -20                           |
| 9       | 220       | 1,45                                                     | 15         | 0,3   | 22        | 0,025                       | 80    | 0,35         | 2                    | -25                           |
| 10      | 210       | 1,25                                                     | 17         | 0,3   | 21        | 0,025                       | 110   | 0,35         | 2                    | 19                            |

### Б.8. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В АТМОСФЕРІ ТЕПЛИЦІ

Технологія вирощування рослин у теплицях передбачає їхню вентиляцію, основне призначення якої наступне:

- регулювати температуру повітря;
- видаляти повітря, з якого поглинений діоксид вуглецю - вуглекислий газ (він необхідний для стимулювання асиміляції рослин);

- запобігати виникненню навколо рослин ділянок з відносно вологим повітрям.

У теплицях, як правило, застосовують кватиркову систему вентиляції. Для цих цілей використовують кватирки (фрамуги) підвітряних верхніх закслених скатів теплиць. Найбільш просто з погляду технічної реалізації режимом вентиляції можна керувати за допомогою САР температури повітря в теплиці. Один з можливих варіантів такої системи показаний на рисунку Б.8.

Об'єктом регулювання в цій системі є теплиця 1, регульованою величиною — температура повітря  $\theta$  у теплиці, регулюючий вплив — кут повороту фрамуги 2, а головним обурюючим впливом - зміна температури атмосферного повітря  $\theta_a$ . Температура в теплиці  $\theta$  вимірюється терморезистором  $R_d$  включеним у мостову схему 3. Резистором  $R_0$  задається необхідне значення температури. Мостова схема також забезпечує порівняння напруги  $U$ , що знімається з терморезистора  $R_d$ , з напругою, що задається,  $U_0$ . У результаті порівняння цих напруг виходить сигнал неузгодженості  $\Delta U = U_0 - U$ , що підсилюється підсилювачем 4. Посилений сигнал  $U_y$  через двигун постійного струму 6, редуктор 7, шестірню 5 і рейку 8 керує фрамугою 2, чим забезпечується зміна регулюючого впливу  $\omega$  на вході об'єкта регулювання.

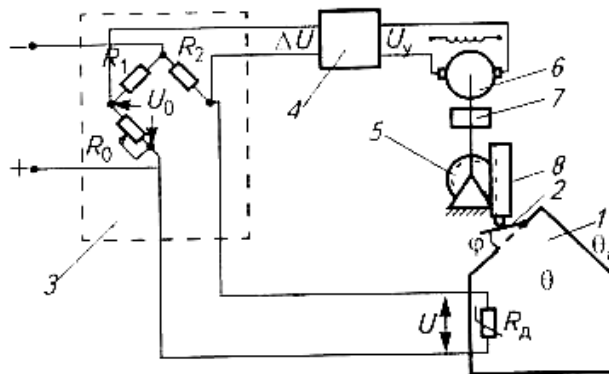


Рисунок Б.8. Схема САР температури повітря в теплиці

Динамічні властивості об'єкта регулювання описуються рівнянням

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 \varphi(t - \tau) - k_a \theta_a,$$

де  $T_0$  — постійна часу, с;  $k_1$ , — передаточний коефіцієнт по регулюючому впливі, °C/рад;  $\tau$  — час запізнювання, с;  $k_a$  — передаточний коефіцієнт по обурюючому впливі.

\*Зображення по Лапласу запізнілої функції  $\varphi(t - \tau)$  при нульових початкових умовах  $\varphi(t - \tau) \rightarrow \varphi(p)e^{-p\tau}$ .

Рівняння динаміки елементів САР наступні:

$$T_d \frac{dU}{dt} + U = k_d \theta \quad - \text{датчик};$$

$$\Delta U = U_0 - U \quad - \text{схема порівняння сигналів};$$

$$U_y = k_y \Delta U \quad - \text{підсилювач};$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = k_\varphi U_y \quad - \text{заслонка і електромагніт без обліку електромеханічних перехідних процесів (спрощене рівняння)};$$

Фізична сутність змінних величин, що входять у рівняння, представлена вище в описі схеми САР. Параметри  $T_0$ ,  $T_d$  і  $k_d, k_\varphi$  — відповідно постійні часу і передаточні коефіцієнти відповідних елементів.

Розмірності параметрів і їхнє значення по варіантах завдань наведені в таблиці Б.8. Задане значення температури повітря  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Б.9. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В РЕСИВЕРІ

На рисунку Б.9 зображена схема САР тиску  $P$  у ресивері (повітрязбірнику)  $I$ , що є в даній системі об'єктом регулювання. Тиск у ресивері регулюється за допомогою зміни кількості повітря  $Q$ , що залежить від положення заслонки 2, тобто від її лінійного переміщення  $X_3$ , яке можна розглядати як регулюючий вплив на вході об'єкта регулювання. Зовнішнім збурюванням, що викликає відхилення регульованої величини – тиску  $P$ , є зміна витрати стисненого повітря  $Q_c$ .

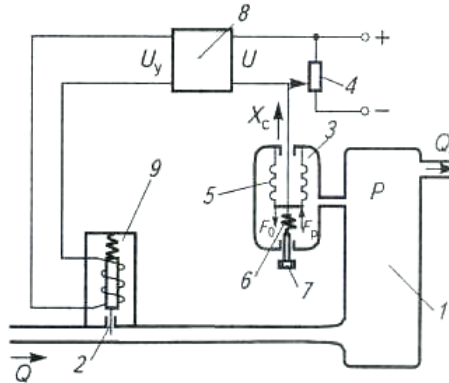


Рисунок Б.9. Схема САР тиску в ресивері

Тиск у даній системі контролюється за допомогою сильфоного датчика 3, вихідна величина якого – переміщення  $X_c$  ильфона 5 однозначно залежить від різниці сил  $\Delta F = F_0 - F_p$ , де  $F_p$  – сила, створювана тиском  $P$ ;  $F_0$  – сила натягу пружини 6, яку можна змінювати гвинтом 7.

Переміщення сильфона  $X_c$  за допомогою потенціометричного перетворювача 4 перетвориться в електричний сигнал – напруга  $U$ , що підсилюється електронним підсилювачем 8. Вихідний сигнал підсилювача  $U_v$  керує електромагнітним приводом 9, пов'язаним із заслонкою 2.

У даної САР сильфоний датчик виконує функції сприймаючого, задаючого порівнюючого органів. Як сприймаючий орган він контролює тиск  $P$ , переводячи його в силу  $F_p$ . Завдання необхідного тиску в ресивері забезпечується за допомогою сили  $F_0$ . Як порівняльний орган, сильфон забезпечує порівняння величин  $F_0$  і  $F_p$ , у результаті чого, як відзначалося раніше, виходить  $\Delta F = F_0 - F_p$  – сигнал неузгодженості.

Динамічні властивості об'єкта регулювання і елементів САР описуються наступною системою рівнянь:

$$F_p = k_B P \quad - \quad \text{сприймаючий орган;}$$

$$\Delta F = F_0 - F_p \quad - \quad \text{порівнюючий орган};$$

$$T_0 \frac{d p}{d t} + p = k_0 X_3 - k_Q Q_C \quad - \text{ресивер}$$

$$T_2^2 \frac{d^2 X_C}{dt} + T_1 \frac{d X_C}{dt} + X_C = k_C \Delta F \quad - \quad \text{сильфон;}$$

$U = k_{II} X_C$  – потенціометричний перетворювач;

$$U_v = k_v \Delta U \quad - \quad \text{підсилювач;}$$

$$T_3 \frac{dX_3}{dt} + X_3 = k_3 U \quad - \quad \text{електромагнітний привод разом із заслонкою.}$$

Фізична сутність змінних, вхідних у рівняння, представлені вище в описі схеми САР. Параметри  $T_0, T_1, T_2, T_3$  і  $k_0, k, k_b, k_c, k_p, k_v, k_3$  – відповідно постійні часу і коефіцієнти передачі. Їхні розмірності і значення по варіантах дані в таблиці Б.9. Необхідне значення тиску  $P = 500$  кПа.

#### Б.9. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $T_0, \text{с}$ | $k_0, \text{кПа/мм}$ | $T_1, \text{с}$ | $T_2, \text{с}$ | $k_c, \text{мм/Н}$ | $k_b, \text{Н/кПа}$ | $k, \text{кПа} \cdot \text{с/м}^3$ | $\Delta Q_c, \text{м}^3/\text{с}$ | $k_p, \text{В/мм}$ | $k_v$ | $T_3, \text{с}$ | $k_3, \text{мм/В}$ |
|---------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|
| 1       | 1,3             | 5                    | 0,2             | 0,045           | 2,5                | 0,5                 | 200                                | 0,1                               | 0,2                | 20    | 0,01            | 2                  |
| 2       | 1,2             | 4                    | 0,25            | 0,04            | 2,5                | 0,5                 | 180                                | -0,2                              | 0,2                | 30    | 0,01            | 2                  |
| 3       | 0,6             | 3,5                  | 0,34            | 0,022           | 2,5                | 0,5                 | 190                                | 0,3                               | 0,2                | 25    | 0,01            | 2                  |
| 4       | 0,15            | 4,8                  | 0,25            | 0,035           | 2,5                | 0,5                 | 170                                | -0,15                             | 0,2                | 24    | 0,01            | 2                  |
| 5       | 0,7             | 4,5                  | 0,3             | 0,04            | 2,5                | 0,5                 | 160                                | 0,12                              | 0,2                | 22    | 0,01            | 2                  |
| 6       | 0,8             | 3,5                  | 0,18            | 0,025           | 2,5                | 0,5                 | 150                                | -0,2                              | 0,2                | 21    | 0,01            | 2                  |
| 7       | 0,5             | 4,5                  | 0,25            | 0,03            | 2,5                | 0,5                 | 140                                | 0,1                               | 0,2                | 20    | 0,01            | 2                  |
| 8       | 0,65            | 5,5                  | 0,2             | 0,02            | 2,5                | 0,5                 | 180                                | -0,12                             | 0,2                | 25    | 0,01            | 2                  |
| 9       | 0,7             | 6                    | 0,4             | 0,025           | 2,5                | 0,5                 | 200                                | 0,13                              | 0,2                | 26    | 0,01            | 2                  |
| 10      | 0,55            | 7                    | 0,25            | 0,035           | 2,5                | 0,5                 | 210                                | -0,14                             | 0,2                | 27    | 0,01            | 2                  |

#### Б.10. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ГІДРОТУРБИНИ

На електричних станціях при виробництві електроенергії висувають певні вимоги до стабільності частоти  $f$  генеруючою ЕДС. Частота  $f$  однозначно визначається кутовою швидкістю  $\omega$  робочого колеса гідротурбіни. У зв'язку із цим гідротурбіни на електростанціях оснащують САР кутової швидкості. На рисунку Б.10 показана схема одного з варіантів такої САР.

У даній системі об'єктом регулювання є гідротурбіна 1, регульованою величиною – кутова швидкість  $\omega$ . Вона при постійній витраті води змінюється залежно від навантаження на валу турбіни, тобто від потужності  $P$ , що споживається від генератора 2 (зі збільшенням потужності кутова швидкість знижується, зі зменшенням – зростає). Таким чином, потужність  $P$  є зовнішнім обурюючим впливом на об'єкті регулювання. Для регулювання кутової швидкості передбачена заслонка 3, за допомогою якої змінюється витрата води через турбіну. Він однозначно залежить від вертикального переміщення  $X$  заслінки. Отже, переміщення заслінки  $X$  можна розглядати як регулюючий вплив об'єкта регулювання. Кутова швидкість контролюється за допомогою тахогенератора 4, ЕДС  $E$  якого рівняється з задаючою напругою,  $U_0$ . Сигнал неузгодженості  $\Delta U$  через підсилювач 5 керує за допомогою електродвигуна 6 і редуктора 7 заслонкою 3.

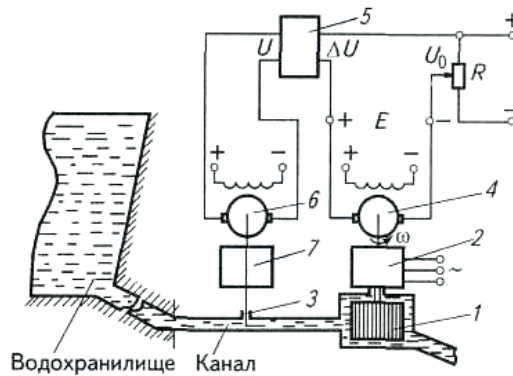


Рисунок Б.10. Схема САР кутової швидкості робочого колеса гідротурбіни

Динамічні властивості елементів САР описуються наступною системою рівнянь:

$$T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X - k_1 P \quad - \text{гідротурбіна};$$

$$E = k_T \omega \quad - \text{тахогенератор};$$

$$\Delta U = U_0 - E \quad - \text{порівнюючий орган};$$

$$U = k_y \Delta U \quad - \text{електронний підсилювач};$$

$$T_M T_{я} \frac{d^3 X}{dt^3} + T_M \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{dX}{dt} = k_{\Sigma} U \quad - \text{електродвигун разом з редуктором і заслонкою}.$$

Фізичний зміст змінних, вхідних у рівняння, представлений в описі схеми САР. Параметри  $T_0$ ,  $T_M$ ,  $T_{я}$  і  $k_0, k_T, k_y, k_{\Sigma}$  – відповідно постійні часу і передаточні коефіцієнти. Їхні розмірності і значення по варіантах наведені в таблиці Б.10. Задане значення швидкості  $\omega = 30$  рад/с.

**Б.10. Значення параметрів елементів САР**

| Варіант | $T_0$ , с | $k_0$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{см}}$ | $K_1$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{кВт}}$ | $k_T$ , $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ | $k_y$ | $P$ , кВт | $T_M$ , с | $T_{я}$ , с | $k_{\Sigma}$ , $\frac{\text{см}}{\text{с} \cdot \text{В}}$ |
|---------|-----------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|-----------|-----------|-------------|------------------------------------------------------------|
| 1       | 0,1       | 8                                                     | 0,01                                                   | 1,0                                                  | 80    | -100      | 0,02      | 0,005       | 0,02                                                       |
| 2       | 0,15      | 7                                                     | 0,015                                                  | 1,0                                                  | 100   | 80        | 0,019     | 0,004       | 0,02                                                       |
| 3       | 0,11      | 6                                                     | 0,016                                                  | 1,0                                                  | 90    | -70       | 0,018     | 0,003       | 0,02                                                       |
| 4       | 0,12      | 5                                                     | 0,01                                                   | 1,0                                                  | 85    | 90        | 0,017     | 0,002       | 0,02                                                       |
| 5       | 0,15      | 9                                                     | 0,01                                                   | 1,0                                                  | 100   | -95       | 0,016     | 0,002       | 0,02                                                       |
| 6       | 0,2       | 4                                                     | 0,011                                                  | 1,0                                                  | 110   | 85        | 0,015     | 0,002       | 0,02                                                       |
| 7       | 0,1       | 7                                                     | 0,015                                                  | 1,0                                                  | 120   | -75       | 0,014     | 0,002       | 0,02                                                       |
| 8       | 0,14      | 6                                                     | 0,018                                                  | 1,0                                                  | 85    | 60        | 0,02      | 0,005       | 0,02                                                       |
| 9       | 0,16      | 5                                                     | 0,01                                                   | 1,0                                                  | 90    | -100      | 0,018     | 0,003       | 0,02                                                       |
| 10      | 0,18      | 8                                                     | 0,01                                                   | 1,0                                                  | 100   | 95        | 0,016     | 0,002       | 0,02                                                       |

## Б.11. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГЛИБИНИ ОРАНКИ

Завдання такій САР (Рисунок Б.11, а) полягає в стабілізації глибини оранки, відхилення якої відповідно до агротехнічних вимог не повинні перевищувати  $\pm 1,5$  см на рівних ділянках поля і  $\pm 3$  см на нерівних ділянках.

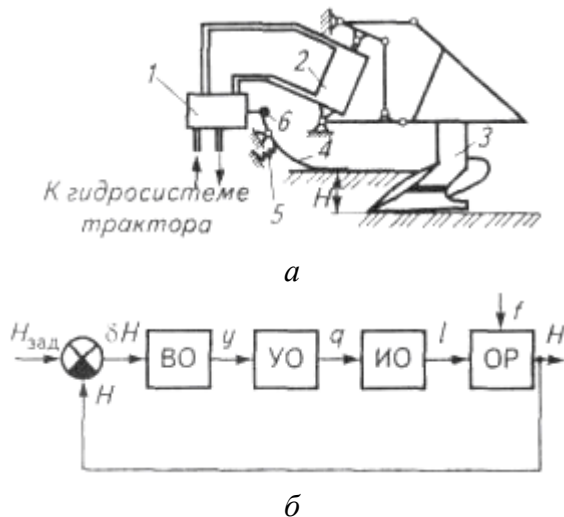


Рисунок Б.11. Схеми САР глибини оранки:

*а* – принципова; *б* – функціональна; 1 – золотниковий гідророзподільник;  
2 – гідроциліндр; 3 – плуг; 4 – хитна планка з полозком; 5 – пружина;  
6 – гвинт

Робота системи, побудованої на принципі регулювання по відхиленню дійсної глибини оранки від заданої відбувається в такий спосіб.

Глибина оранки  $H$  вимірюється хитною планкою з полозком 4. Відхилення планки передається на золотниковий гідророзподільник 1, що керує роботою гідроциліндра 2. При відхиленні глибини оранки  $H$  у сторону збільшення планка з полозком здійметься і перемістить плунжер золотникового гідророзподільника в таке положення, при якому масло від гідросистеми трактора почне надходити в нижню порожнину гідроциліндра. Поршень гідроциліндра переміститься нагору і тим самим зменшить глибину плуга. При зменшенні глибини оранки система буде діяти у зворотному напрямку. Пружина 5 забезпечує постійний контакт полозка 4 з поверхнею ґрунту.

Об'єкт регулювання (ОР, Б.11, б) – плуг 3; вихідна величина об'єкта – глибина оранки  $H$ , вхідна – переміщення  $l$  штока гідроциліндра. Сприймаючим органом (СО) служить полозковий копір 4, на вхід якого надходить сигнал  $\delta H$  про відхилення величини  $H$  від  $H_{\text{зад}}$ , а виходом є пропорційне відхиленню переміщення плунжера золотникового гідророзподільника  $y$ . Підсилювальний орган (ПО) – золотниковий гідророзподільник 1, на виході якого з'являється потік масла  $q$ , пропорційний  $y$ . Виконавчий орган системи (ВО) – гідроциліндр 2. Потік масла  $q$ , спрямований у ту або іншу порожнину гідроциліндра, є вхідним сигналом виконавчого органа, а вихідним сигналом – переміщення  $l$  штока гідроциліндра, що змінює положення об'єкта регулювання і його вихідну величину  $H$ . За допомогою гвинта 6 змінюється положення сприймаючого органа і задається глибина оранки  $H_{\text{зад}}$ . Таким чином, порівнюючий органом є сам сприймаючий орган (положення підстави копіра щодо ріжучої крайки плуга). Тільки у випадку відповідності дійсної глибини оранки  $H$  заданої  $H_{\text{зад}}$  золотник гідророзподільника буде встановлюватися в таке положення при якому масло від гідросистеми не буде попадати у виконавчий орган. Обурюючими впливами  $f$  на об'єкт регулювання є вертикальні коливання плуга, що виникають при русі орного агрегату по нерівностях поверхні поля.

Дослідження системи проведіть при зміні задаючого впливу на САР без обліку обурюючих впливів на об'єкт регулювання.

Динамічні властивості елементів САР описуються наступною системою рівнянь:  
 $\delta H = H_{\text{зад}} - H$  – порівнюючий орган;

$$\begin{aligned}
 y &= k_b \delta H & - & \text{сприймаючий орган;} \\
 q &= k_y y & - & \text{підсилювальний орган;} \\
 \frac{dl}{dt} &= k_n q & - & \text{виконавчий орган;} \\
 T_0 \frac{dH}{dt} + H &= k_0 l & - & \text{об'єкт регулювання (без обліку обурюючих впливів).}
 \end{aligned}$$

Фізичний зміст змінних, вхідних у рівняння, представлений в описі схеми САР. Параметри  $k_b$ ,  $k_y$ ,  $k_n$ ,  $k_0$  і  $T_0$  – відповідно передаточні коефіцієнти і постійна часу. Їхні розмірності і значення по варіантах зазначені в таблиці Б.11. Задане значення глибини оранки  $H_{\text{зад}} = 0,25$  м.

#### Б.11. Значення параметрів елементів САР

| Варіант | $k_b$       | $k_y, \frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{м}}$ | $k_n, \frac{\text{м}/\text{с}}{\text{м}^3/\text{с}}$ | $k_0$ | $T_0, \text{с}$ |
|---------|-------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|-----------------|
| 1       | 0,4...4...4 | 1,9                                         | 1,1                                                  | 3,5   | 0,1             |
| 2       | 0,5...5...5 | 1,8                                         | 1,05                                                 | 3,5   | 0,09            |
| 3       | 0,5...5...5 | 1,71                                        | 1,0                                                  | 3,5   | 0,08            |
| 4       | 0,5...5...5 | 1,6                                         | 0,95                                                 | 3,5   | 0,07            |
| 5       | 1...10...10 | 1,5                                         | 0,9                                                  | 3,5   | 0,06            |
| 6       | 1...10...10 | 1,4                                         | 0,85                                                 | 3,5   | 0,06            |
| 7       | 1...10...10 | 1,3                                         | 0,8                                                  | 3,5   | 0,07            |
| 8       | 1...10...10 | 1,2                                         | 0,75                                                 | 3,5   | 0,08            |
| 9       | 1...10...10 | 1,1                                         | 0,7                                                  | 3,5   | 0,09            |
| 10      | 1...10...10 | 1,0                                         | 0,65                                                 | 3,5   | 0,1             |

Проведіть моделювання перехідного процесу САР для зазначеного викладачем варіанта. Вивчіть вплив коефіцієнта передачі сприймаючого органа  $k_b$  на характеристики перехідного процесу САР.

## ДОДАТОК В

### ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ ПО НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

#### В.1. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ В ПРИМІЩЕННІ

У САР (див. додаток Б.1) магнітний підсилювач замінений на трипозиційний електронний підсилювач-модулятор, статична характеристика якого показана на рисунку В.1.

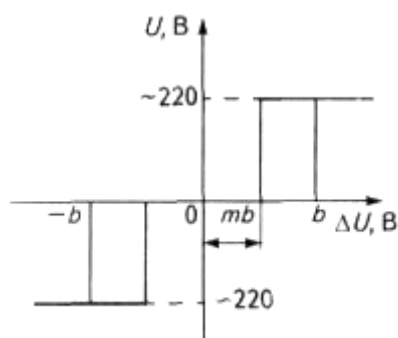


Рисунок В.1. Статична характеристика релейного підсилювача:

$b$  – поріг спрацьовування (зона нечутливості);  $m$  – коефіцієнт повернення;  
 $\sim 220, \sim 220$  – значення напруги на виході підсилювача (протилежні по фазі)

У результаті комп'ютерного моделювання даної САР для одного з варіантів (див. табл. Б.1) підберіть значення параметрів релейного підсилювача  $b$  і  $m$ , при яких у системі будуть мати місце автоколивання режими.

#### В.2. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ

У САР (див. додаток Б.2) диференціальний магнітний підсилювач замінений на електронний трипозиційний релейний підсилювач-модулятор, що має статичну характеристику, наведену на рисунку В.2.

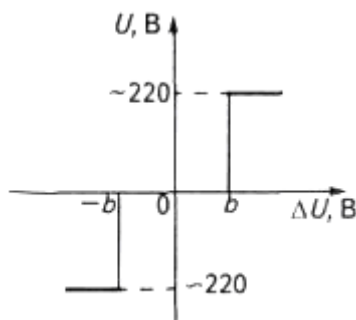


Рисунок В.2. Статична характеристика релейного підсилювача:

$b$  – поріг спрацьовування (зона нечутливості);  $\sim 220, \sim 220$  – значення напруги на виході підсилювача (протилежні по фазі)

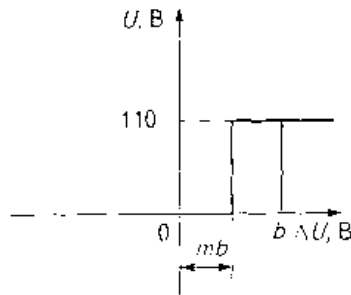
За допомогою комп'ютерного моделювання САР визначіть граничне значення зони нечутливості між автоколиваннями режимами роботи системи й режимами із загасаючими перехідними процесами.

### В.3. РЕЛЕЙНА САР КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У САР (див. додаток Б.3) магнітний підсилювач 2 (див. рисунок Б.3) замінений на тиристорний двопозиційний релейний підсилювач, статична характеристика якого має вигляд, показаний на рисунку В.3.

У процесі комп'ютерного моделювання даної САР визначить значення параметрів  $b$  і  $m$ , за межами яких у системі будуть відбуватися збіжні перехідні процеси.

Рисунок В.3. Статична характеристика тиристорного підсилювача:



$b$  – зона нечутливості;  $m$  – коефіцієнт повернення;  $mb$  – поріг відпускання

### В.4. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ЗЕРНОСУШАРКИ

У САР (див. додаток Б.4) підсилювач 4 (див. рисунок Б.4) замінений на релейний підсилювач, що має трипозиційну статичну характеристику (рисунок В.4).

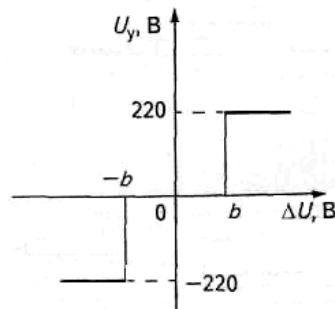


Рисунок В.4. Статична характеристика релейного підсилювача:

$b$  – зона нечутливості (поріг спрацьовування)

Для заданого варіанта (див. табл. Б.4) у процесі комп'ютерного моделювання даної САР визначить залежність параметрів автоколивання (частоти і амплітуди) від зони нечутливості  $b$ .

### В.5. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЦІ

У САР (див. додаток Б.6) підсилювач 4 замінений на релейний двопозиційний підсилювач, що має статичну характеристику, показану на рисунку В.5.

Для одного з варіантів (див. табл. Б.6) за завданням викладача виконайте комп'ютерне моделювання даної САР, визначить значення параметрів  $b$  і  $m$ , при яких у системі будуть відсутні автоколивання режими.

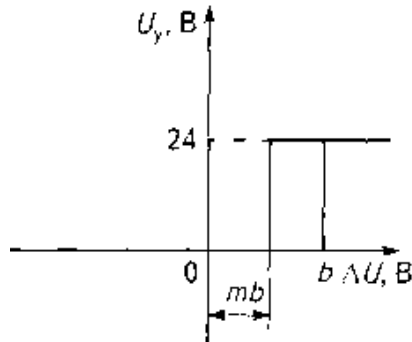


Рисунок В.5. Статична характеристика релейного підсилювача:

$b$  – поріг спрацьовування;  $m$  – коефіцієнт повернення;  $mb$  – поріг відпускання

### В.6. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ, ЩО ПОДАЄТЬСЯ В ЗЕРНОСУШАРКУ

У САР (див. додаток Б.7) пропорційний електронний підсилювач 6 (див. рисунок Б.7) замінений двопозиційним релейним підсилювачем, статична характеристика якого має вигляд, показаний на рисунку В.6.

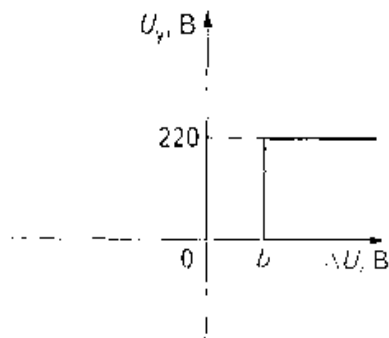


Рисунок В.6. Статична характеристика підсилювача:

$b$  – поріг спрацьовування (зона нечутливості)

За завданням викладача для одного з варіантів (див. табл. Б.7) виконайте моделювання релейної системи регулювання, у результаті чого визначить граничне значення зони нечутливості  $b$ , за межами якого в САР будуть відбуватися збіжні перехідні процеси.

## В. 7. РЕЛЕЙНА САР ТЕМПЕРАТУРИ В АТМОСФЕРІ ТЕПЛИЦІ

У САР (див. додаток Б.8) пропорційний підсилювач 4 замінений релейним підсилювачем. Статична характеристика підсилювача показана на рисунку В.7.

Проведіть комп'ютерне моделювання даної САР для одного з варіантів відповідно до таблиці Б.8 (за завданням викладача). У процесі моделювання при  $m = 1$  визначіть граничне значення зони нечутливості  $b$ , при якому в системі будуть автоколивальні режими. Для цього значення  $b$  знайдіть залежності параметрів автоколивальні (частоти  $\omega$  і амплітуди  $A$ ) від величини коефіцієнта повернення  $m$ .

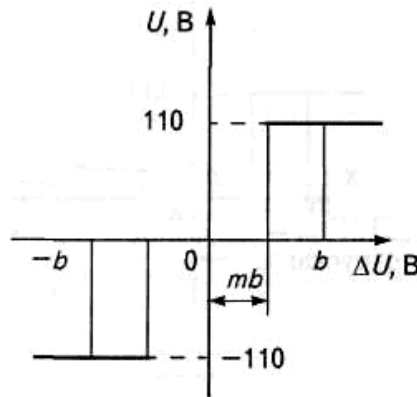


Рисунок В.7. Релейна характеристика із зоною нечутливості й гістерезисом:

$b$  – зона нечутливості;  $m$  – коефіцієнт повернення, значення якого можуть бути будь-яким дробовим числом в інтервалі  $-1 \leq m \leq 1$

## В.8. РЕЛЕЙНА САР ТИСКУ В РЕСИВЕРІ

У САР (див. додаток Б.9) підсилювач 8 (див. рисунок В.9) замінений релейним двопозиційним підсилювачем, статична характеристика якого зображена на рисунку В.8.

Для одного з варіантів відповідно до таблиці Б.9 (за завданням викладача) проведіть комп'ютерне моделювання релейної системи. У результаті моделювання визначить залежність параметрів автоколивальних (частоти  $\omega$  і амплітуди  $A$ ) від величини зони нечутливості.

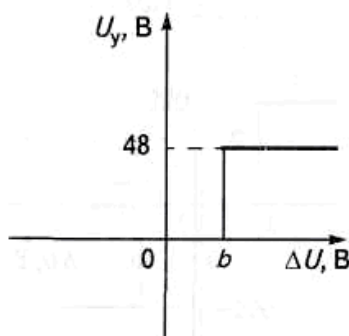


Рисунок В.8. Статична характеристика релейного підсилювача:

$b$  – зона нечутливості (порог спрацьовування)

### В.9. РЕЛЕЙНА САР КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ГІДРОТУРБИНИ

У САР (див. додаток Б.10) пропорційний електронний підсилювач замінений релейним підсилювачем, статична характеристика якого показана на рисунку В.9.

Проведіть моделювання даної САР для одного з варіантів таблиці Б.10 (за узгодженням з викладачем). У процесі моделювання знайдіть значення параметрів  $m$  і  $b$ , при яких у системі не буде автоколивань.

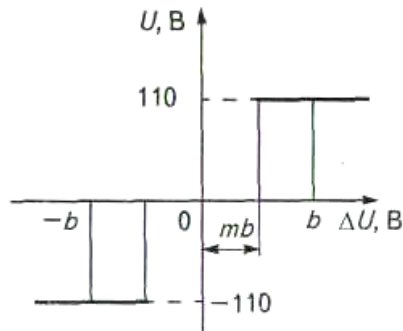


Рисунок В.9. Релейна характеристика загального виду:

$b$  – зона нечутливості;  $m$  – коефіцієнт повернення ( $-1 \leq m \leq 1$ )

### В.10. НЕЛІНІЙНА САР ГЛИБИНИ ОРАНКИ

У САР глибини оранки (див. додаток Б.11) прийнята спрощена математична модель золотникового гідророзподільника у вигляді пропорційної ланки (див. рисунок Б.11) з передаточною функцією  $W(p) = k_y$ . У дійсності золотниковий гідророзподільник є нелінійним елементом, статична характеристика якого показана на рисунку В.10.

З представленням уточненої статичної характеристики (див. рисунок В.10) виконайте комп'ютерне моделювання даної САР для одного з варіантів відповідно до таблиці Б.11 (за узгодженням з викладачем) при східчастому задаючому впливі  $\pm 0,05$  м. Вивчіть вплив коефіцієнта передачі сприймаючого органа  $k_b$  на характер перехідного процесу САР.

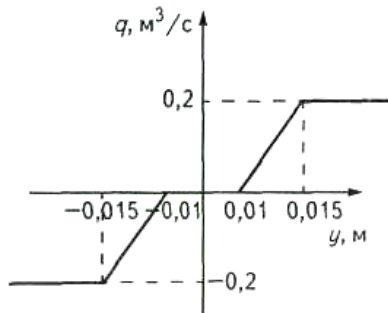


Рисунок В.10. Статична характеристика золотникового гідророзподільника

## В.11. ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ (ЦАП) В ХАРАКТЕРОГРАФ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРІВ

**Мета:** продемонструвати перетворення цифрового коду в електричний струм.

Прилади й обладнання: загальне обладнання та приладдя, двопробеневий електронний осцилограф, характерограф для транзисторів.

На рисунок В.11 приведена спрощена схема, яка пояснює принцип отримання на екрані осцилографа сімейства вихідних характеристик біполярного транзистора в схемі включення з загальним емітером. На рисунок В.11.1 і В.11.2 наведені принципові схеми двох варіантів характерографу, а на рисунок В. 11.3 - монтажна плата другого з них.

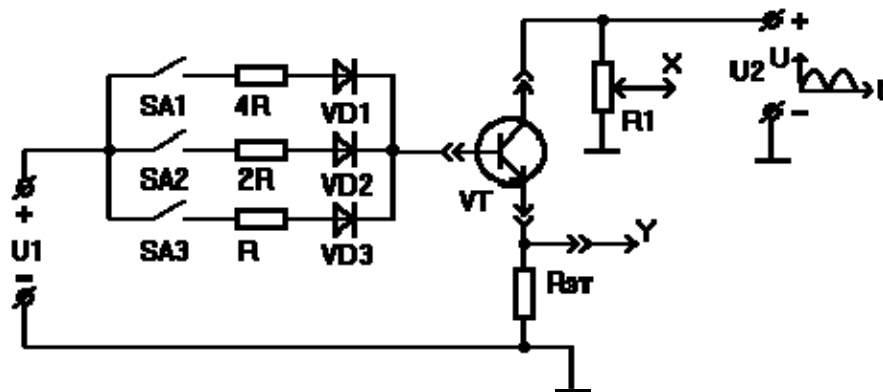


Рисунок В.11. Спрощена схема сімейства вихідних характеристик біполярного транзистора в схемі включення з загальним емітером

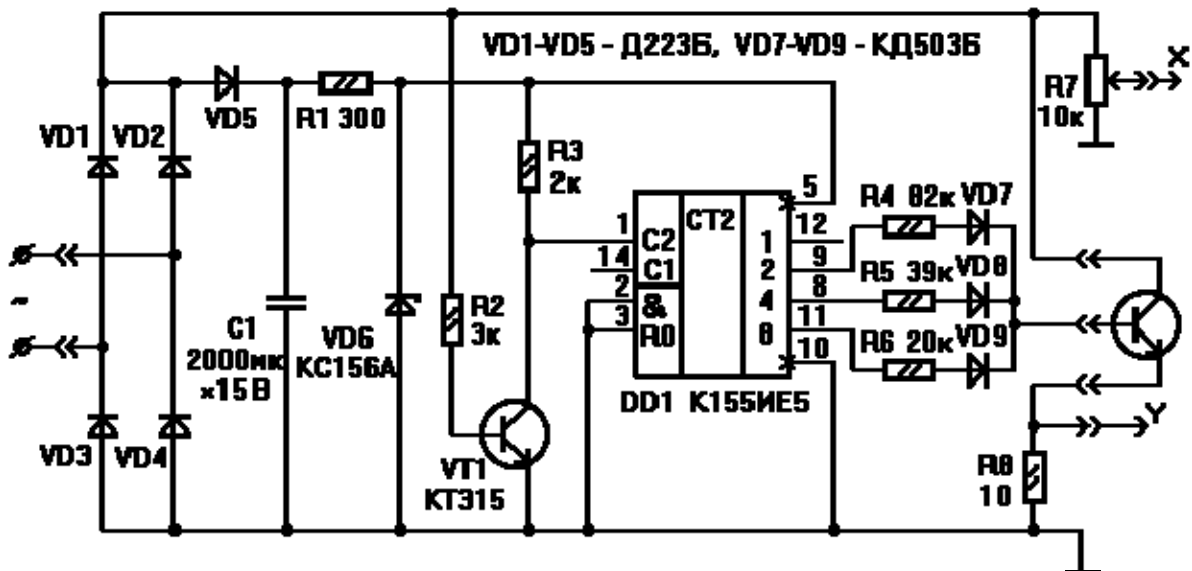


Рисунок В.11.1. Принципова схема першого варіанту характерографу

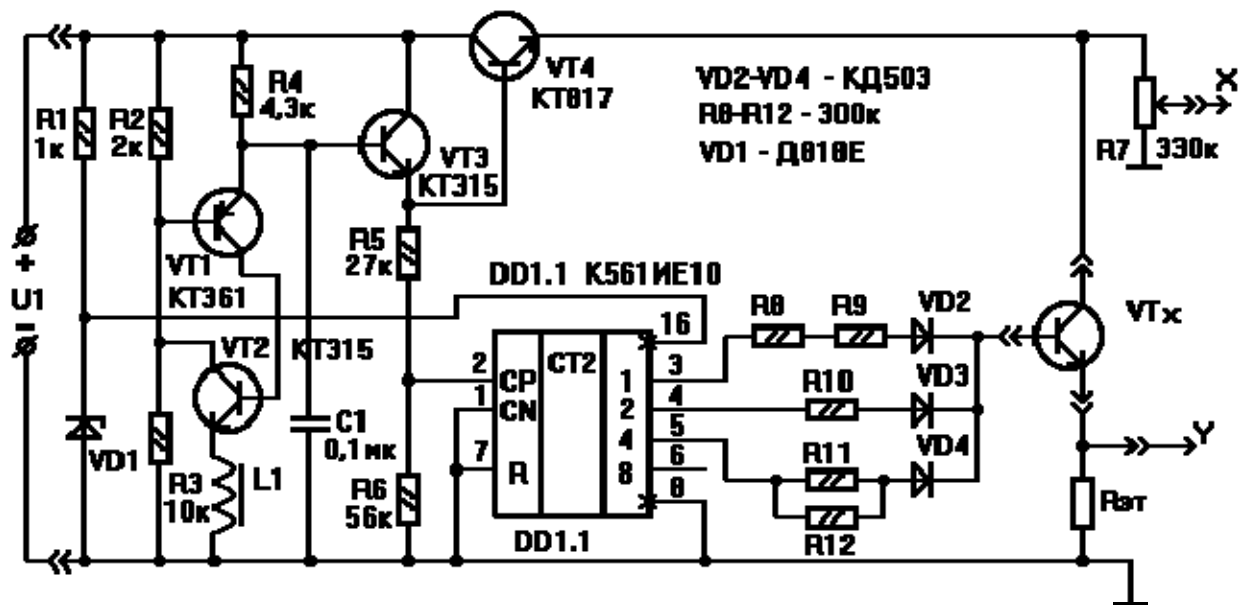


Рисунок В.11.2. Принципова схема другого варіанту характерограф

Коефіцієнт відхилення осцилографа по осі Y вибирають найменшим (Максимальна чутливість). Опір «вагових» резисторів в ланцюзі бази визначають, виходячи з допустимих струмів колектора і передбачуваних коефіцієнтів посилення досліджуваних транзисторів.

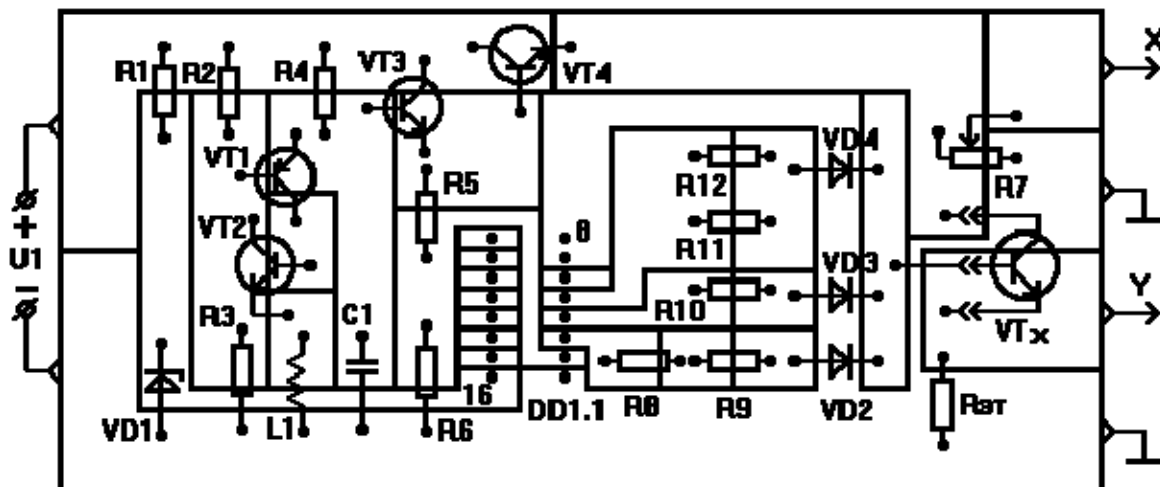


Рисунок В.11.3. Монтажна плата другого варіанта

В ході демонстрації замальовують сімейство вихідних характеристик транзистора, залежність сили струму емітера, сили струму бази і напруга база-емітер транзистора як функції часу. Для спостереження залежності сили струму бази від часу колектор транзистора відключають від схеми і збільшують опір резистора в ланцюзі емітера, з якого сигнал подається на вхід Y.

## В.12. МЕТАЛОШУКАЧ

**Мета:** продемонструвати виявлення металевих предметів за допомогою металошукача.

**Прилади й принадлежности:** загальне обладнання та приладдя, металошукача.

Металошукач (Рисунок В.12) призначений для виявлення металевих предметів під покривом снігу або ґрунту. Принцип роботи більшості металошукачів заснований на порівнянні частот двох генераторів. Сигнал одного з генераторів використовується в якості опорної частоти, а до складу коливального контуру другого генератора входить пошукова котушка індуктивності. Сигнали з обох генераторів подаються на змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти. Сигнал різницевої частоти зазвичай подається на головні телефони. Якщо пошукова котушка наближається до металевого предмету, то частота другого генератора змінюється і змінюється тональність звуку в головних телефонах.

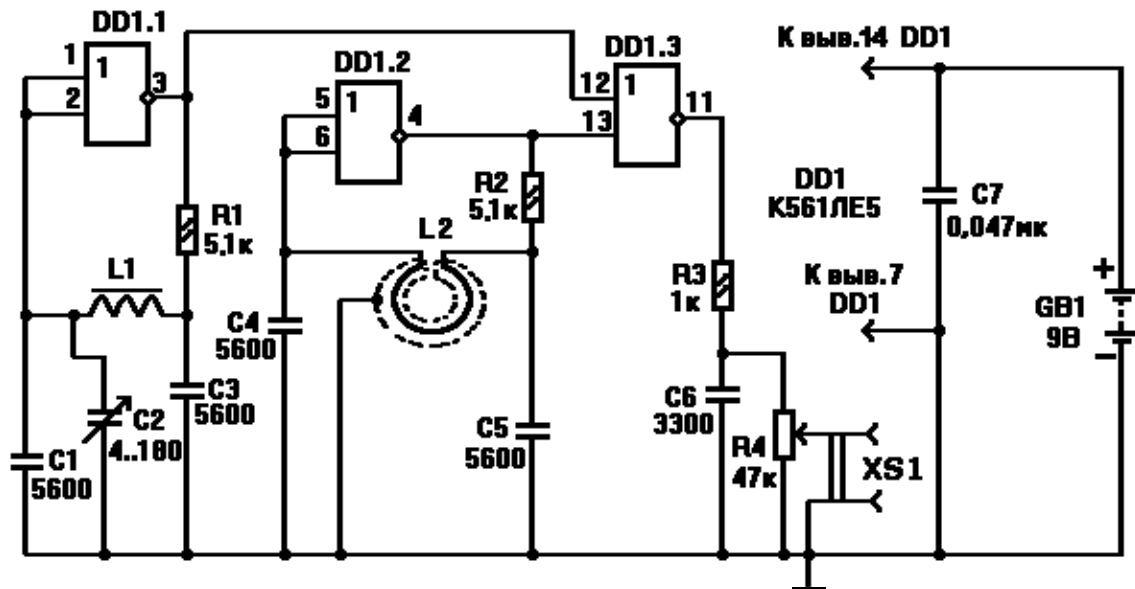


Рисунок В.12. Принципова схема металошукача

В ході проведення демонстрації показують можливість виявлення феромагнітних і діамагнітних металів. При поясненні принципу роботи металошукачів необхідно вказати призначення всіх елементів, звернувши особливу увагу на конструкції вимірювальних (пошукових) котушок, а також зазначити, чому можна відрізнити феромагнітний матеріал від діамагнітного.

## В.13. ВИЗНАЧЕННЯ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ ВИТКІВ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ

**Мета:** продемонструвати визначення короткозамкнених витків котушки індуктивності, звернути увагу на правильну настройку пристрою.

**Прилади й приналежності:** загальне обладнання та приладдя, пристрій для визначення короткозамкнених витків котушки індуктивності.

На рисунок В.13.1, В.13.2 наведені принципові схеми пристроїв для визначення короткозамкнених витків котушок індуктивності, а на рисунок В.13.3 - монтажна схема першого з них. У схемі на рисунок В.13.1 індикатором зриву коливань в LC-генераторі є світлодіод, а в схемі на рисунок В.13.2 - осцилограф. Резисторами R3 (грубо) і R1 (плавно) підбирається робоча точка транзистора так, щоб при піднесенні до феритовому стрижні контрольного короткозамкнутого витка відбувався зрив коливань LC-генератора. Така настройка при правильному підборі витків котушки зв'язку можлива при двох положеннях змінного резистора R3. Це обумовлено тим, що при збільшенні напруги база-емітер зростає сила струму емітера, а коефіцієнт посилення транзистора при цьому спочатку зростає, досягає максимального значення і потім зменшується.

При експлуатації пристрою необхідно правильно підібрати режим роботи транзистора. Якщо налаштувати пристрій на максимальну чутливість, то можна отримати його помилкове спрацювання внаслідок наведення вихрових струмів в провіднику котушки. Тому чутливість вибирають такою, щоб можна було виявити один короткозамкнений виток котушки з діаметром, приблизно рівним зовнішньому діаметру котушки.

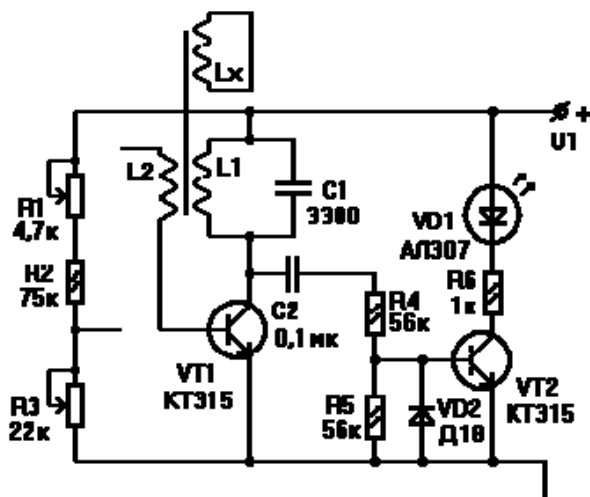


Рисунок В.13.1

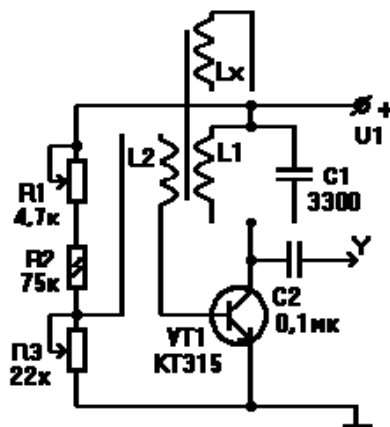
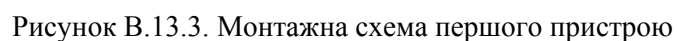


Рисунок В.13.2

Принципові схеми пристроїв для визначення короткозамкнених витків котушок індуктивності



~ 153 ~

## ЛИТЕРАТУРА

1. Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования / под редакцией Б. А. Карташова. – Москва: КолосС, 2006. - 184 с.
2. **Иноземцев, В. А.** Лабораторный практикум по основам автоматики / В.А.Иноземцев, С.В.Иноземцева, М. Н.Степанищева; под редакцией В. А. Иноземцева. – Брянск: БГПУ, 1998. - 80 с.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП .....                                                                                                                           | 3   |
| 1. МЕТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....                                                               | 4   |
| 1.1. ФОРМИ ПОДАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                                                        | 4   |
| 1.2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                                                                   | 12  |
| 1.2.1. Мета моделювання Систем Автоматичного Регулювання .....                                                                        | 12  |
| 1.2.2. Аналіз стійкості і якості Систем Автоматичного Регулювання .....                                                               | 13  |
| 1.2.3. Корекція Системи Автоматичного Регулювання .....                                                                               | 16  |
| 1.2.4. Оптимізація Системи Автоматичного Регулювання .....                                                                            | 24  |
| 1.2.5. Спрощення математичних моделей Системи Автоматичного Регулювання з урахуванням малих параметрів.....                           | 25  |
| 2. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МВТУ І РЕКОМЕНДАЦІЇ З ЙОГО ВИКОРИСУНОКТАННЯ .....                                        | 28  |
| 2.1. ПРИНЦИПИ Й МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                                                           | 28  |
| 2.2. ПУСК ПК МВТУ.....                                                                                                                | 33  |
| 2.3. КОМАНДНЕ МЕНЮ ГОЛОВНОГО ВІКНА .....                                                                                              | 33  |
| 2.4. ПАНЕЛЬ ІНСТРУМЕНТІВ ГОЛОВНОГО ВІКНА .....                                                                                        | 35  |
| 2.5. ЛІНІЙКА ТИПОВИХ БЛОКІВ .....                                                                                                     | 36  |
| 2.6. КОРОТКИЙ ОПИС ПРОЦЕДУР Й ЕТАПІВ РОБОТИ В ПК МВТУ.....                                                                            | 37  |
| ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ .....                                                                                                              | 39  |
| РОБОТА 1. ВИВЧЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МВТУ НА ПРИКЛАДАХ МОДЕЛЮВАННЯ ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....       | 39  |
| РОБОТА 2. ВИВЧЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МВТУ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                | 54  |
| РОБОТА 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....                                                  | 72  |
| РОБОТА 4. ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                                                            | 77  |
| РОБОТА 5. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ САР .....                                                                                            | 90  |
| РОБОТА 6. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ СТАТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ У ВИГЛЯДІ АНАЛІТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ..... | 96  |
| РОБОТА 7. МОДЕЛЮВАННЯ САР З НЕЛІНІЙНИМИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМИ РІВНЯННЯМИ .....                                                             | 104 |
| ДОДАТОК А. ФРАГМЕНТИ БІБЛІОТЕК ПК МВТУ .....                                                                                          | 112 |
| ДОДАТОК Б. ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ ПО ЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....                                        | 128 |
| ДОДАТОК В. ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ ПО НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....                                     | 144 |