

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТУ

Кафедра «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту»

**Методичні вказівки**

щодо підготовки та виконання практичних занять із дисципліни  
«Автоматизовані розрахунки та САПР»  
для студентів спеціальності 7.092202  
«Електричний транспорт»  
усіх форм навчання

Київ – 2013

УДК 658.512.22.011.56

**Дубравін Ю. Ф.** Методичні вказівки щодо підготовки та виконання практичних занять із дисципліни «Автоматизовані розрахунки та САПР» для студентів спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт» усіх форм навчання. – К.: ДЕТУТ, 2013. –37 с.

У методичних вказівках щодо підготовки та виконання практичних занять із дисципліни «Автоматизовані розрахунки та САПР» розглянуті питання за темами лекційного матеріалу та розділами курсової роботи. Методичні вказівки включають шість практичних занять, у яких розглянуто приклади автоматизованого розрахунку керованого моста з використанням Mathcad, створення електронної таблиці Microsoft Office Excel у середовищі Mathcad, автоматизації процесу синтезу системи регулювання та моделювання САР у середовищі Simulink. У методичних вказівках розглянуті також елементи системи автоматизації розробки та виконання конструкторської документації за допомогою програмових засобів AutoCaD.

Методичні вказівки розглянуті та затверджені на засіданні кафедри «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту» (протокол № 9 від 19 грудня 2009 р.) та на засіданні методичної комісії факультету ІРСЗТ університету (протокол № 8 від 18.03.2010 р.).

Призначені для студентів спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт» спеціалізації «Електровози та електропоїзди» усіх форм навчання та відповідають робочій програмі курсу «Автоматизовані розрахунки та САПР».

*Укладач:* **Ю. Ф. Дубравін**, кандидат технічних наук, доцент

*Рецензенти:* **В. Г. Гришко**, доктор технічних наук, професор;  
**Є.Д. Попович**, начальник бюро промислової електроніки  
ВАТ «Київський ЕВРЗ»

## Зміст

Вступ.....	4
Практичне заняття 1. Визначення основних параметрів перетворювача.....	5
Практичне заняття 2. Зв'язок між схемним рішенням випрямляча та його коефіцієнтом потужності.....	10
Практичне заняття 3. Синтез системи регулювання електродвигуна.....	15
Практичне заняття 4. Побудова кореневого годографа САР.....	23
Практичне заняття 5. Оцінка стійкості САР за допомогою логарифмічної амплітудно-частотної характеристики та перехідної функції .....	27
Практичне заняття 6. Побудова схеми перетворювача з використанням засобів AutoCAD.....	31
Список літератури.....	36

## *Вступ*

Наш час характеризується гігантським ростом продуктивних і творчих можливостей техніки. Такий прогрес людського інтелекту є результатом співдружності людини з електронною обчислювальною машиною (ЕОМ), що змінила обличчя сучасної науки і техніки. У першу чергу це стосується використання ЕОМ та систем на їхній основі для проектування складних об'єктів. Це дозволяє не лише зменшити терміни розробки і знизити трудомісткість проектування, а й знайти вигідніші технічні та економічні рішення. Автоматизація включає в себе весь спектр робіт, починаючи з технічного завдання, виконання на ЕОМ стандартних інженерних розрахунків і закінчуючи виготовленням проектної документації. У міру ускладнення створених виробів стає все важче оцінювати конкретний варіант проекту, його відповідність вихідним вимогам; збільшується кількість варіантів проекту, які необхідно проаналізувати. Вихід зі становища дає зміна і впорядкування технології проектування шляхом впровадження системи автоматизованого проектування (САПР), що є комплексом обчислювальних пристроїв, засобів зв'язку, засобів відображення, математичних моделей та спеціальних мов програмування.

Підготовка студентів із дисципліни «Автоматизація розрахунків та САПР» передбачає вивчення методичних прийомів, які дозволяють ефективно досліджувати найважливіші проблеми й завдання, пов'язані із проектуванням систем електрорухомого складу і їх технічною експлуатацією на залізничному транспорті. Мета практичних занять – допомогти студентам поглибити знання методів розробки САПР, використання засобів проектування за допомогою інженерної САПР, реалізованої на базі персонального комп'ютера для проектування окремих видів робіт. Так, виконання розрахунково-інженерних робіт здійснюється з використанням засобів Microsoft EXCEL та Mathcad, розробка та дослідження електромеханічних систем тягових електроприводів та їхніх систем управління здійснюється за допомогою Matlab/Simulink, а виконання креслярських і графічних робіт – з використанням системи AutoCAD. Офісне програмове забезпечення Microsoft WORD використовуємо для редагування описової частини технічної документації. Запропоновані у вказівках задачі і приклади їхнього рішення допоможуть студентам у виконанні курсової роботи. Дані методичні вказівки щодо підготовки та виконання практичних занять складені відповідно до навчальної і робочої програм курсу «Автоматизація розрахунків та САПР» для студентів спеціальності 8.092202 «Електричний транспорт» усіх форм навчання.

## Практичне заняття 1

Тема заняття: *Визначення основних параметрів перетворювача*

Зміст заняття:

1. Вибір схеми перетворювача.
2. Математична модель перетворювача.
3. Автоматизація розрахунку перетворювача.
4. Аналіз параметрів перетворювача.

Виконання завдання

### **1. Вибір схеми перетворювача.**

Плавне безконтактне регулювання напруги з перетворенням змінного струму в постійний можливе при використанні перетворювачів, побудованих по мостовій однофазній схемі. Однофазні мостові керовані випрямлячі можуть мати схеми симетричні з повним числом керованих плечей і несиметричні з половиною керованих плечей. З огляду на можливість застосування рекуперативного гальмування доцільно використовувати мостові випрямлячі, побудовані по симетричній схемі. Такі випрямлячі можуть працювати як випрямлячі в режимі тяги та як інвертори в режимі рекуперативного гальмування.

Вихідними даними для вибору основних параметрів перетворювача є номінальне значення випрямленого струму  $I_{дн}$ , що споживається електродвигуном, і номінальне значення випрямленої напруги  $U_{дн}$ . Порядок розрахунку параметрів перетворювача такий.

а) Визначаємо необхідне діюче та максимальне значення напруги вторинної обмотки тягового трансформатора  $U_{2m}$ , до виводів якої включений перетворювач;

б) визначаємо параметри тягового трансформатора;

в) визначаємо коефіцієнт перекручення  $\nu$  струму;

г) визначаємо кут комутації тиристорів  $\gamma$  та коефіцієнт потужності  $\chi$ ;

д) визначаємо індуктивний опір  $X$  обмоток трансформатора та мережі живлення;

е) визначаємо втрати напруги  $\Delta U_\gamma$ , пов'язані з комутацією, та середнє значення випрямленої напруги  $U_{d\alpha}$  в розрахунковому режимі.

## 2. Математична модель перетворювача.

Миттєве значення напруги живлення  $u_2 = \sqrt{2} * U_2 * \sin(\omega t)$ ;

середнє значення випрямленої напруги при холостому ході

$$U_{do} = 2 * \frac{\sqrt{2} * U_2}{\pi};$$

колова частота напруги живлення  $\omega = 2 * \pi * f_c$ ;

середнє значення випрямленої напруги залежно від кута керування  $\alpha$

$$U_{d\alpha} = U_{do} * \cos(\alpha) - \Delta U_\gamma;$$

середні втрати напруги, пов'язані з комутацією тиристорів

$$\Delta U_\gamma = \frac{2 * I_d * X}{\pi};$$

індуктивний опір мережі та обмоток трансформатора

$$X = \frac{U_k * U_{2m}}{\sqrt{2} * I_{dn}};$$

максимальна пряма напруга на вентилі

$$U_{nptm} = \frac{\pi * U_{do} * \sin(\alpha)}{2};$$

максимальне значення зворотної напруги на вентилі

$$U_{bmt} = \frac{\pi * U_{do}}{2};$$

коефіцієнт потужності випрямляча

$$\chi = \frac{P_{a1}}{S_1} = \frac{I_{1(1)}}{I_1} \cos \varphi;$$

кут зрушення фаз між першою гармонікою струму  $i_{1(1)}$  і напругою  $u_1$  первинної обмотки трансформатора

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}.$$

## 3. Приклад автоматизації перетворювача з використанням MathCad.

### Розрахунок однофазного керованого симетричного моста

Вихідні данні:

Номінальна напруга живлення випрямляча, В  $U_1 := 25000$

Номінальна випрямлена напруга, В  $U_d := 800$

Номінальний струм навантаження, А  $I_{dn} := 1500$

Розрахунковий кут керування, рад  $\alpha_p := 0.55$

Відносне значення напруги короткого замикання трансформатора  $U_k := 0.078$

Частота напруги живлення, Гц  $f_c := 50$

Амплітудне значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора, В

$$E_{2m} := \frac{U_d \cdot \pi}{2 \cdot \cos(\alpha_p) - \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot U_k} \quad E_{2m} = 1576 \quad \text{В}$$

Діюче значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора, В

$$E_2 := \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} \quad E_2 = 1114.4 \quad \text{В}$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора при  $E_1 := U_1$

$$K_t := \frac{E_1}{E_2} \quad K_t = 22.434$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А

$$I_{2H} := I_{dn} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha_p}{\pi}} \quad I_{2H} = 1362.4$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора, А

$$I_{1H} := \frac{I_{2H}}{K_t} \quad I_{1H} = 60.7$$

Типова потужність трансформатора, ВА при  $U_2 := E_2$

$$S_T := \frac{1.11 \cdot U_2 \cdot I_{2H}}{\cos(\alpha_p)} \quad S_T = 1976745.1$$

Діюче значення струму 1-ї гармоніки струму в первинній обмотці трансформатора, А

$$I_{11} := \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1H}}{\pi} \quad I_{11} = 54.7$$

Коефіцієнт перекручення струму

$$v := \frac{I_{11}}{I_{1H}} \quad v = 0.9$$

Кут комутації тиристорів при  $I_d := 500$

$$\cos \gamma := 1 - \frac{U_k \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot I_{dn}} \quad \cos \gamma = 0.982$$

$$\gamma := \arccos(\cos \gamma) \quad \gamma = 0.192 \quad \text{рад}$$

Коефіцієнт потужності випрямляча

$$\chi := \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \cos\left(\alpha_p + \frac{\gamma}{2}\right) \quad \chi = 0.719$$

Середнє значення струму вентиля  $I_a := \frac{I_{dn}}{2} \quad I_a = 750 \quad \text{A}$

Середнє значення випрямленої напруги в нерегульованому режимі ( $\alpha=0$ )

$$U_{do} := \frac{2 \cdot E_{2m}}{\pi} \quad U_{do} = 1003.3 \quad \text{B}$$

Індуктивний опір мережі та обмоток трансформатора, ом

Середнє значення випрямленої напруги в нерегульованому режимі ( $\alpha=0$ )

$$U_{do} := \frac{2 \cdot E_{2m}}{\pi} \quad U_{do} = 1003.3 \quad \text{B}$$

Індуктивний опір мережі та обмоток трансформатора, ом

$$X := \frac{U_k \cdot E_{2m}}{\sqrt{2} \cdot I_{dn}} \quad X = 0.058$$

Середні втрати випрямленої напруги, пов'язані з комутацією тиристорів

$$\Delta U_{\gamma} := \frac{2 \cdot I_d \cdot X}{\pi} \quad \Delta U_{\gamma} = 18.445 \quad \text{B}$$

Середнє значення випрямленої напруги в розрахунковому режимі ( $\alpha = \alpha_p$ )

$$U_{d\alpha} := U_{do} \cdot \cos(\alpha_p) - \Delta U_{\gamma} \quad U_{d\alpha} = 836.9 \quad \text{B}$$

Максимальна пряма напруга на вентилі

$$U_{пм} := \pi \cdot \frac{U_{do} \cdot \sin(\alpha_p)}{2} \quad U_{пм} = 823.7 \quad \text{B}$$

Максимальне значення зворотної напруги на вентилі

$$U_{bm} := \frac{\pi \cdot U_{do}}{2} \quad U_{bm} = 1576 \quad \text{B}$$

Колова частота змінного струму  $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f_c \quad \omega = 314.159 \quad \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$

Задаємо значення часу: початкове, кінцеве та крок зміни  $j := 0.000001$

$$t := 0, j.. 0.04$$



Формування допоміжної змінної для відліку часу кута керування

$$z(t) := \frac{\omega \cdot t}{\pi} - \text{floor}\left(\frac{\omega \cdot t}{\pi}\right)$$

Визначення миттєвого значення випрямленої напруги, В

$$u_d(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha p + \gamma \geq z(t) \cdot \pi \\ \left| \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \right| & \text{otherwise} \end{cases}$$

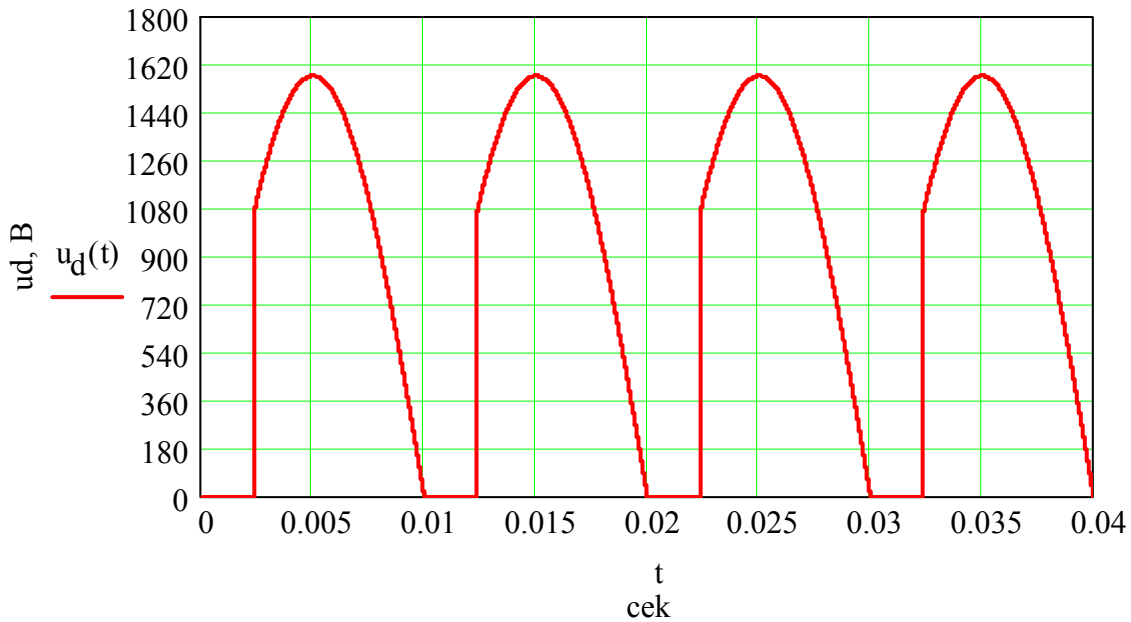


Рис.1. Графік миттєвого значення випрямленої напруги

Значення миттєвої випрямленої напруги при означеному  $t=0.008$

$$u_d(0.008) = 926.336 \quad \text{В}$$

#### 4. Аналіз параметрів перетворювача.

Використовуючи Mathcad необхідно ввести програму розрахунку параметрів перетворювача та пояснити таке:

- вплив кута керування на середнє значення випрямленої напруги;
- характер зміни миттєвої випрямленої напруги;
- вплив струму навантаження на кут комутації тиристорів;
- вплив струму навантаження на втрати випрямленої напруги, пов'язані з комутацією.

## Контрольні запитання

1. Призначення моделі предмета проектування.
2. Як створити модель процесу функціонування системи?
3. Які переваги автоматизованого проектування?
4. Як впливає величина струму навантаження на кут комутації?
5. Як впливає величина струму навантаження на втрати випрямленої напруги?

## Практичне заняття 2

Тема заняття: *Зв'язок між схемним рішенням випрямляча та його коефіцієнтом потужності.*

Зміст заняття:

1. Коефіцієнт потужності випрямляча та фактори, що впливають на його значення.
2. Визначення залежності коефіцієнта потужності випрямляча від струму навантаження.
3. Визначення залежності коефіцієнта потужності випрямляча від кута керування випрямляча.

## Виконання завдання

1. Коефіцієнт потужності є один із головних енергетичних показників випрямної установки. Коефіцієнт потужності випрямляча являє собою відношення середнього значення активної потужності первинної обмотки трансформатора за період до повної потужності первинної обмотки

$$K_{\Pi} = \frac{P_{a1}}{S_1}$$

Коефіцієнт потужності характеризує збільшення навантаження мережі та систем енергопостачання, що спричиняється зсувом по фазі струму відносно напруги та наявністю вищих гармонік струму, тобто викривленням форми струму. В загальному випадку одночасно має місце зсув по фазі та викривлення форми струму, при цьому коефіцієнт потужності

$$K_{\Pi} = v * \cos\varphi,$$

де  $\varphi$  – зсув по фазі;

$v = \frac{I_{(1)1}}{I_1}$  – коефіцієнт викривлення струму;

$I_{(1)1}, I_1$  – відповідно діюче значення 1-ї гармоніки струму та діюче значення струму в первинній обмотці трансформатора.

При  $\cos\varphi = 1$  коефіцієнт потужності дорівнює коефіцієнту викривлення струму і має найбільше значення  $K_{\Pi} = \nu = 2\sqrt{2}/\pi = 0,9$ . При фазовому імпульсному регулюванні змінної напруги коефіцієнт потужності знижується під впливом процесу комутації та зсуву фази першої гармоніки струму відносно напруги. Якщо прийняти, що під час комутації струм у вентилях змінюється по лінійному закону, то зсув по фазі 1-ї гармоніки струму  $i_{(1)1}$  відносно напруги  $u_1$  можна прийняти рівним

$$\varphi_{(1)} = \alpha + \gamma/2,$$

де  $\gamma$  – кут комутації тиристорів.

Коефіцієнт потужності випрямляча при цьому буде визначатися виразом

$$K_{\Pi} = 2\frac{\sqrt{2}}{\pi} * \cos(\alpha + \frac{\gamma}{2}).$$

Кут комутації тиристорів можна визначити з формули

$$\gamma = \arccos(1 - \frac{U_K * I_n}{\sqrt{2} * I_{nH}}).$$

Середнє значення випрямленої напруги залежно від кута керування  $\alpha$  обчислюємо за допомогою формули

$$U_{d\alpha} = U_{d0} * \cos(\alpha) - \frac{2 * I_a * X}{\pi} \Delta U_{\gamma},$$

де  $X = \frac{U_K * U_2}{I_{aH}}$  – індуктивний опір обмоток трансформатора;  $\cos(\alpha) = 1 - \frac{U_K * I_n}{\sqrt{2} * I_{nH}}$ .

Коефіцієнт потужності залежить від діапазону регулювання напруги та числа секцій вторинної обмотки трансформатора. Для підвищення коефіцієнта потужності ЕРС з керованими випрямлячами використовують багатозонне регулювання напруги. Тому виникає необхідність збільшення числа виводів трансформатора.

2. Залежність коефіцієнта потужності випрямляча від струму навантаження знаходимо при незмінному значенні кута керування  $\alpha$  та зміні струму навантаження у межах від 0 до  $1,3 I_{aH}$ . Результати розрахунку необхідно показати у вигляді електронної таблиці Microsoft Office Excel. Таблицю Excel створюємо в середовищі Mathcad. Для цього в меню Mathcad «Insert Component» створюємо таблицю Excel з передачею вхідних даних з Mathcad в Excel і зворотню передачу вихідних параметрів. Вхідними параметрами є номінальний струм навантаження  $I_{nH}$ , відносна напруга короткого трансформатора  $u_K$  та кут керування  $\alpha$ . Вихідними параметрами електронної таблиці є коефіцієнт потужності  $K_{\Pi}$  та струм навантаження  $I_n$ . Порядок розрахунку наведений в прикладі 1. Інтервал струму навантаження розбито на

ряд інтервалів в межах від 0 до  $1,3 I_{dn}$ . У колонці Z таблиці здійснюємо розрахунок складової  $\gamma$   $Z = \frac{U_K * I_n}{\sqrt{2} * I_{nH}}$ , в наступній колонці  $\cos(\alpha) = 1 - \frac{U_K * I_n}{\sqrt{2} * I_{nH}}$ . У колонці  $\gamma$  обчислюємо значення кута  $\gamma$  при обраних значеннях струму навантаження  $I_n$ . В колонці Y обчислюємо суму  $\alpha + \frac{\gamma}{2}$ . За результатами розрахунку будемо графік, приведений на рис. 2 та робимо висновок щодо залежності  $K_p$  від струму навантаження  $I_n$ .

Приклад 1. Розрахунок залежності  $K_p = f(I_n)$

Вхідні дані:

Номинальний струм навантаження, A

$$I_{nH} := 400$$

відносне значення напруги короткого замикання

$$u_k := 0.07$$

трансформатора, B

$$\alpha_p := 1.2$$

кут керування

Таблиця 1

$$\begin{pmatrix} I_n \\ K_p \end{pmatrix} :=$$

Розрахунок залежності коефіцієнта потужності від $I_n$						
Вхідні дані:						
$I_n =$	400	$U_k =$	0,07	Alfa =	1,2	
N з/п	$I_n, A$	Z	$\cos(\alpha)$	$\gamma$	Y	$K_p$
1	0	0	1	0	0,3624	0,3264
2	52	0,0064	0,9936	0,1135	0,3089	0,2783
3	104	0,0129	0,9871	0,1606	0,2864	0,258
4	156	0,0193	0,9807	0,1968	0,269	0,2423
5	208	0,0257	0,9743	0,2274	0,2543	0,2291
6	260	0,0322	0,9678	0,2544	0,2412	0,2173
7	312	0,0386	0,9614	0,2788	0,2293	0,2066
8	364	0,045	0,955	0,3013	0,2184	0,1967
9	416	0,0515	0,9485	0,3223	0,2081	0,1875
10	468	0,0579	0,9421	0,342	0,1985	0,1788

$$(I_{nH} \quad u_k \quad \alpha_p)$$

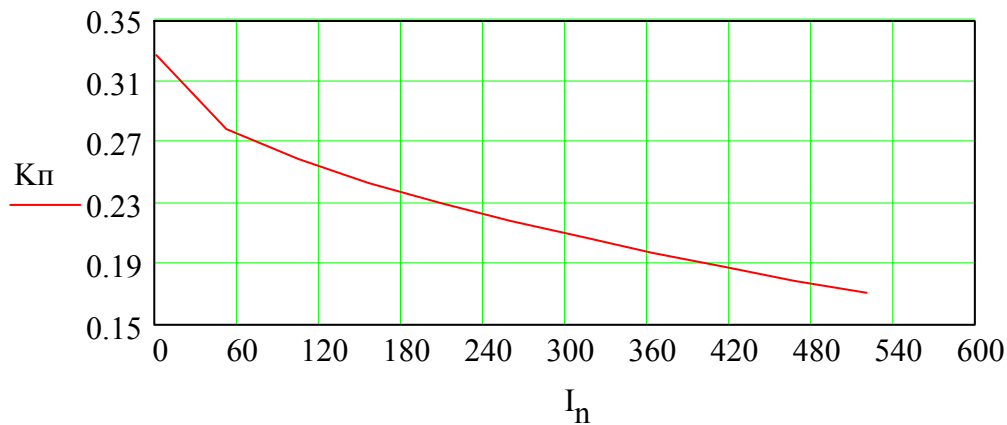


Рис. 2. Графік залежності  $K_p=f(I_n)$

3. Залежність коефіцієнта потужності випрямляча від кута керування випрямляча знаходимо виходячи з того, що необхідно забезпечити наперед задане середнє значення випрямленої напруги  $U_{d\alpha}$  і відповідно незмінне значення струму навантаження  $I_n$  при різних варіантах схеми живлення випрямляча, які відрізняються напругою  $U_2$  вторинної обмотки трансформатора. Кут керування тиристорів  $\alpha$  змінюють у межах від 0 до 1,26 радіанів, як це показано в прикладі 2. Для кожного із значень  $\alpha$  визначають напругу  $U_2$  вторинної обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi * U_{d\alpha}}{2 * (\sqrt{2} * \cos \alpha - \frac{I_n * u_k}{I_{nH}})}$$

Кут комутації тиристорів

$$\gamma = \alpha * \cos \left( 1 - \frac{I_n}{\sqrt{2} * I_{nH}} * u_k \right)$$

У колонці  $S$  визначають суму  $S = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ . У колонці  $K_p$  обчислюється коефіцієнт потужності  $K_p = \frac{2 * \sqrt{2}}{\pi} * S$ . За результатами розрахунку необхідно побудувати залежність  $K_p=f(\alpha)$ , як це показано на рис. 3 та зробити висновок відносно вибору схеми перетворювача.

#### 4. Аналіз впливу параметрів перетворювача на коефіцієнт потужності.

Приклад 2. Розрахунок залежності  $K_p=f(\alpha)$  при

$$U_{d\alpha} := 500 \text{ В} \quad u_k := 0.08 \quad I_n := 300 \text{ А} \quad I_{dH} := 600 \text{ А}$$

$\begin{pmatrix} \alpha \\ K_{\Pi} \end{pmatrix} :=$

Розрахунок залежності коефіцієнта $K_{\Pi}$ від кута $\alpha$						
Вхідні параметри:						
Uda=	500	Uk=	0,08	In=	300	Idn=
N n/n	Alfa	G	U2	Gama	S	$K_{\Pi}$
1	0	1,3742	571,24	0,2388	0,2388	0,8752
2	0,14	1,3604	577,05	0,2388	0,3788	0,8369
3	0,28	1,3191	595,09	0,2388	0,5188	0,7823
4	0,42	1,2513	627,35	0,2388	0,6588	0,7123
5	0,56	1,1582	677,78	0,2388	0,7988	0,6284
6	0,7	1,0417	753,61	0,2388	0,9388	0,5322
7	0,84	0,9039	868,43	0,2388	1,0788	0,4255
8	0,98	0,7477	1049,8	0,2388	1,2188	0,3106
9	1,12	0,5761	1362,5	0,2388	1,3588	0,1896
10	1,26	0,3925	2000	0,2388	1,4988	0,0648

$(U_{d\alpha} \quad u_k \quad I_n \quad I_{dn})$

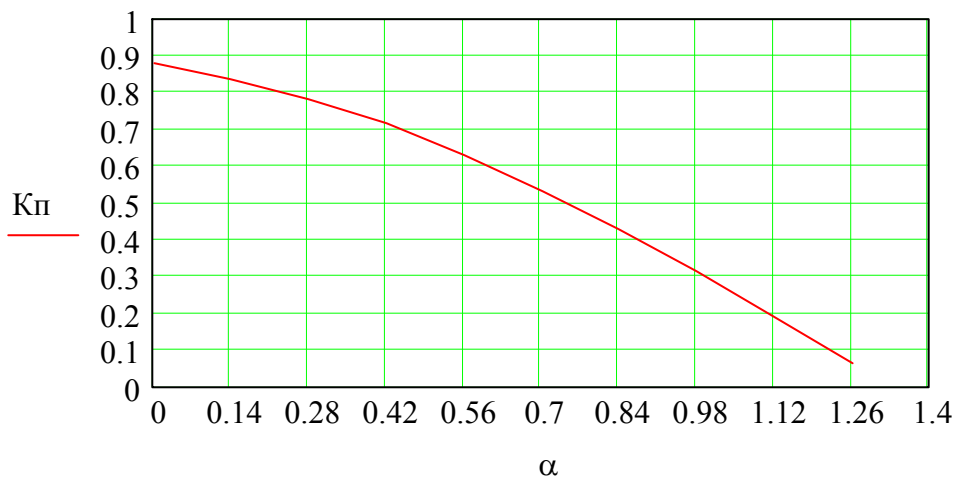


Рис. 3. Графік залежності  $K_{\Pi}(\alpha)$

#### Контрольні запитання

1. Математична модель предмета дослідження.
2. Необхідність використання електронної таблиці Excel.
3. Порядок створення електронної таблиці Excel в Mathcad?
4. Необхідність виконання розрахунків в Mathcad та Excel.
5. Як впливає фаза кута керування на коефіцієнт потужності?

### Практичне заняття 3

Тема заняття: *Синтез системи регулювання електродвигуна.*

Зміст заняття:

1. Ціль і задачі синтезу.
2. Математичні моделі елементів і системи.

Виконання завдання

1. Процес синтезу системи керування включає: визначення цілей керування, вибір керованих змінних, вибір конфігурації системи, виконавчого та керуючого елементів, запис моделей елементів системи, вибір регулятора, оптимізація параметрів і аналіз якості системи.

Задача практичного заняття полягає в синтезі системи регулювання швидкості обертання вала електродвигуна, яка б гарантувала, що дійсна швидкість відрізняється від бажаної не більше, ніж на задану величину. Для забезпечення обертання вала приводу в якості виконавчого елемента вибираємо електродвигун постійного струму, керований по колу якоря, швидкість обертання якого пропорційна прикладеній напрузі. Напряга в колі якоря регулюється перетворювачем. Для реалізації системи зі зворотним зв'язком необхідно використати датчик швидкості обертання, в якості якого вибираємо тахогенератор, вихідна напруга якого пропорційна швидкості обертання його вала. Структурна схема замкнутої системи регулювання швидкості обертання вала електродвигуна зображена на рис. 4. Вхідною координатою є напруга завдання  $U_3$ , а вихідною – швидкість обертання  $\omega$  вала приводу.

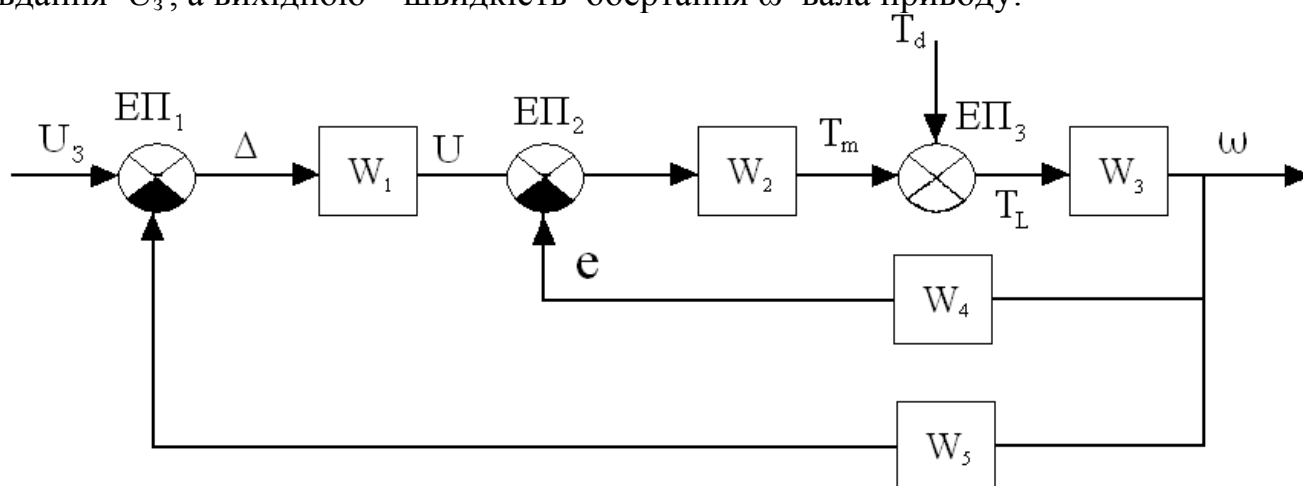


Рис. 4. Структурна схема САР

2. Математичні моделі елементів САР приведені в формі, тобто в вигляді передавальних функцій. Передавальна функція перетворювача

$$W_1 = \frac{K_1}{T_1 s + 1},$$

де  $K_1$  – коефіцієнт передачі,  $K_1=100$ ;

$T_1$  – постійна часу ланки, с.

В електродвигуні вхідною координатою є напруга, прикладена до кола якоря. При незалежному збудженні, коли магнітний потік незмінний, напруга прикладена до кола якоря

$$U_{\text{я}}(p) = (R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p) * i_{\text{я}}(p) + e(p),$$

де  $R_{\text{я}}, L_{\text{я}}$  - відповідно опір та індуктивність кола якоря;

$i_{\text{я}}$  – струм кола якоря,

$e$  – проти е.р.с. електродвигуна.

Струм у колі якоря

$$i_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - e(p)}{R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p}.$$

Проти е.р.с. пропорційна швидкості обертання

$$e(p) = K_4 \omega(p).$$

Момент електродвигуна, що розвивається двигуном

$$T_m(p) = K_2 i_{\text{я}}(p),$$

де  $K_2, K_4$  – постійні коефіцієнти двигуна.

Момент електродвигуна може бути показаний також у вигляді

$$T_m(p) = T_L(p) + T_d(s),$$

де  $T_L(p)$  – момент навантаження;

$T_d(s)$  – момент збурення.

Момент навантаження  $T_L(p) = Jp^2 \omega(p) + bp \omega(p) = T_m(p) - T_d(s)$ ,

де  $J$  – момент інерції на валу приводу;

$b$  – сила тертя, прикладена до валу приводу.

Якщо прийняти  $T_d(s) = 0$ , одержимо передавальну функцію кола якоря двигуна

$$W_2(p) = \frac{K_2}{L_{\text{я}}p + R_{\text{я}}}.$$

Передавальна функція кола навантаження

$$W_3(p) = \frac{K_3}{Jp + b},$$

де  $K_3$  – коефіцієнт передачі кола навантаження.

Передавальна функція ланки, що характеризує залежність е.р.с. від швидкості обертання вала двигуна

$$W_4 = K_4.$$



Передавальна функція ланки, що описує роботу тахогенератора  $W_5=K_5$ .

Необхідно записати еквівалентну передавальну функцію внутрішнього замкнутого кола системи  $W_{234}$ , передавальну функцію розімкнутої та замкнутої системи.

3. Важливе місце серед програмових засобів САПР займає система MATLAB, до складу якої входить пакет Control System Toolbox, призначений для моделювання, аналізу й проектування як безперервних, так і дискретних систем автоматичного керування та регулювання. Функції пакета реалізують методи дослідження динамічних систем, частотні й часові характеристики, обчислення нулів і полюсів систем та відображаються у вигляді графіків і діаграм. У пакеті реалізовані:

- великий набір засобів для аналізу одновимірних і багатовимірних динамічних систем (об'єктів);
- побудова основних характеристик систем: імпульсної, передавальної, перехідної і реакції на довільний вплив;
- побудова частотних характеристик: діаграм Бode (ЛАЧХ, ЛФЧХ), Найквіста (АФХ), Нікольса та ін.;
- розробка замкнутих систем регулювання;
- проектування регуляторів;
- підтримка систем із запізнюванням.

Пакет Control System містить засоби для синтезу систем зі зворотними зв'язками.

MATLAB дає змогу досліджувати системи, які описуються передаточними функціями. Передаточна функція має вигляд відношення двох поліномів. Поліноми чисельника та знаменника записують у вигляді векторів зі списком коефіцієнтів, розділених інтервалами та заключених у квадратні дужки. Для запису передаточних функцій  $W(P)$  окремих ланок і системи в цілому використовуємо функцію `tf(num,den)`.

Передавальна функція послідовно з'єднаних ланок А і В створюється функцією `series`, яка має таку форму запису `sysD=series(sysA, sysB)`. Передавальна функція паралельно з'єднаних ланок А і В створюється функцією `parallel`, яка має таку форму запису `sysE= parallel(sysA, sysB)`. Передавальна функція замкнутої системи створюється функцією `feedback`, яка має таку форму запису `sysF=feedback(sysA, sysB)`, де `sysA` – передавальна функція ланок системи, які замикаються, а `sysB` – передавальна функція ланок системи, які замикають.

Побудова діаграми Найквіста (годографа АФХ) розімкнутої системи здійснюється функцією `nyquist`.

Обчислення та побудова діаграми Бode (ЛАЧХ та ФЧХ) розімкнутої та замкнутої систем здійснюється функцією `bode`. Визначення запасів за модулем і частотою та побудова діаграми Бode здійснюється функцією `margin`. Функція `step` забезпечує побудову перехідної характеристики  $h(t)$  САР, яка показує реакцію ланки або системи на одиничний ступінчастий вплив. Порядок використання приведенного переліку функцій MATLAB показано у вигляді скрипту. Скрипт – це текстовий файл у форматі ASCII, який створюють за допомогою текстового редактора. Він являє собою послідовність інструкцій і функцій, які використовуються на рівні командного рядка. У скрипті послідовно записуємо математичні моделі окремих ланок та всієї системи.

**% Скрипт автоматизованого синтезу САР**

% Вихідні розрахункові параметри:

% коефіцієнт передачі перетворювача

$K_1=100;$

% стала часу перетворювача

$T_1=12 \cdot 10^{-3};$

% коефіцієнт інерції електропривода,  $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 / \text{рад}$

$J=0.4;$

% коефіцієнт передачі двигуна  $\text{Н} \cdot \text{м} / \text{А}$

$K_2=5.0;$

% опір кола якоря двигуна, ом

$R_d=1.0;$

% еквівалентна індуктивність двигуна, Гн

$L_d=0.1;$

% коефіцієнт передачі механічної частини електроприводу

$K_3=1;$

% тертя вала приводу

$b=0.12;$

% коефіцієнт передачі двигуна по е.р.с.  $\text{рад} / \text{с} \cdot \text{В}$

$K_4=2.0$

% коефіцієнт передачі тахогенератора  $\text{рад} / \text{с} \cdot \text{В}$

```

K5=2.5
% запис передавальної функції перетворювача
numW1=[K1];denW1=[T1 1];W1=tf(numW1, denW1);
% запис передавальної функції кола якоря
numW2=[K2]; denW2=[Ld Rd]; W2=tf(numW2, denW2);
% запис передавальної функції механічної частини електроприводу
numW3=[K3]; denW3=[J b]; W3=tf(numW3, denW3);
% запис передавальної функції залежності е.р.с. двигуна від швидкості
обертання
W4=tf([K4], [1])
% запис передавальної функції тахогенератора
W5=tf([K5], [1])
% Спрощення системи. Виключення внутрішнього контура
W23=series(W2, W3);
W234=feedback(W23, W4);
% Передавальна функція розімкнутої системи
Wp1=series(W1, W234); Wp=series(Wp1, W5);
% Передавальна функція замкнутої некорегованої системи –
Wz=Wp/(1+Wp)
Wz=feedback(Wp, [1]);
% обчислюємо запас за модулем (дБ) – Gm та фазі(град.) – Pm
% Wcg - частота, на якій  $\phi(\omega)=-180$  град.;
% Wcp - частота, на якій модуль =0 дБ; mag – модуль; phase – фаза
[Gm, Pm, Wcg, Wcp]=margin(Wp);
% побудова діаграми Найквіста (годографа АФХ) розімкнутої системи
subplot(3,1,1), nyquist(Wp);
title(['Nyquist Diagram Wr', 'Gm=', num2str(Gm), 'Pm=', num2str(Pm)])
% Задаємо діапазон частоти ( $\omega$  змінюється в діапазоні від 0.1 до 3000

```

```

% і має 400 точок, логарифмічний масштаб
w=logspace(0.1,3,400);

% обчислюємо та будуємо діаграму Бode (ЛАЧХ та ЛФЧХ) розімкнутої
системи
subplot(3,1,2), margin(Wp);
title(['Bode Diagram systbz', 'Gm=', num2str(Gm), 'Pm=', num2str(Pm)])

% Передавальна функція корегуючої ланки
Wк=tf(2*[0.012^2 0.0088 1], [1]) ;

% Передавальна функція розімкнутої корегованої системи після
включення послідовної корегуючої ланки
Wpk=series(Wк, Wp1);

% Запис передавальної функції замкнутої корегованої системи
Wzk=feedback(Wpk, W5);

% Побудова перехідної характеристики h(t) корегованої САР
t=[0:0.001:0.2];
subplot(3,1,3), step(Wzk,t)
xlabel('Час t(c)'), ylabel('h(t)')

```

Провести аналіз годографа АФХ розімкнутої САР (рис. 5) та зробити висновок відносно сталості замкнутої САР.

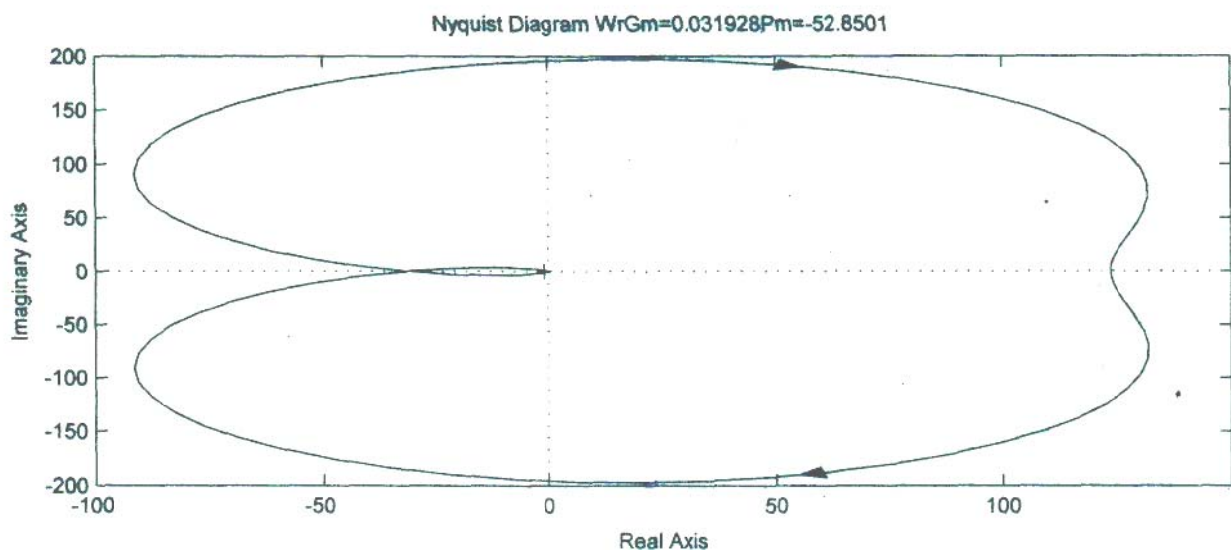


Рис. 5. Годограф амплітудно-фазової характеристики САР

Треба проаналізувати також графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ САР (рис. 6) та зробити висновок відносно запасів стійкості розімкненої системи по частоті та амплітуді.

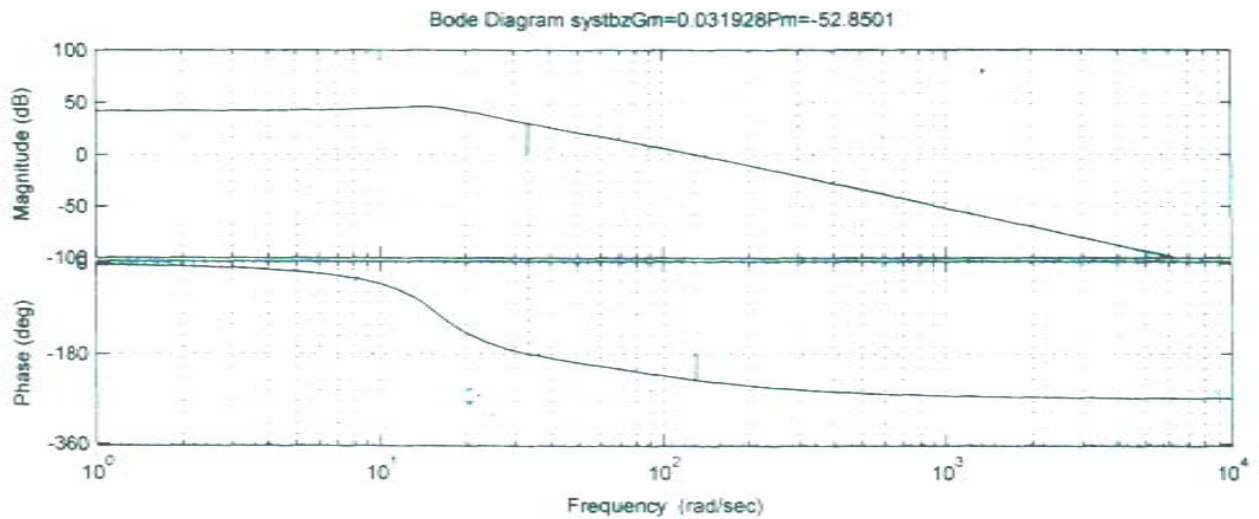


Рис. 6. Логарифмічні амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики САР

Діаграми «bode» та «nyquist» дають змогу зробити оцінку стійкості та якості перехідного режиму в розімкнутій системі. Системи можуть бути структурно стійкими та структурно нестійкими. Структурно стійку систему завжди можна зробити стійкою, змінивши числові значення її параметрів без зміни структурної схеми. Щоб зробити стійкою структурно нестійку систему, треба змінити її структуру, ввівши спеціальну корегуючу ланку, що включається в головний контур системи регулювання послідовно з іншими ланками системи. У наведеному прикладі САР не стійка, тому послідовно з іншими ланками включають корегуючу ланку з передавальною функцією  $W_K$ . На наступному кроці знаходимо передавальну функцію розімкненої корегованої системи  $W_{pk}$  та замкнутої корегованої системи  $W_{zk}$ . Після введення корегуючого регулятора необхідно знову розглянути частотні характеристики та визначити ефективність корекції.

У розглянутому прикладі знайдена перехідна характеристика замкнутої корегованої системи (рис. 7). Характер перехідного процесу оцінюють за видом перехідної функції, що дає змогу зробити висновок відносно стійкості САР, похибки регулювання і тривалості перехідного процесу.

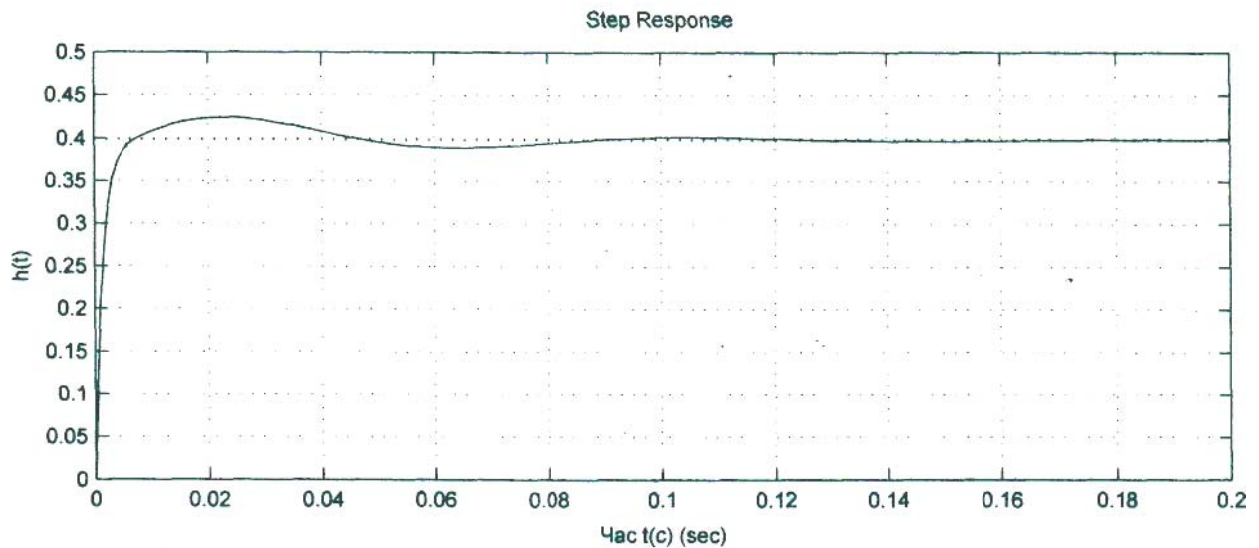


Рис. 7. Графік перехідної характеристики  $h(t)$  замкнутої корегованої системи

Після вибору необхідного типу корегуючої ланки та значень полюсів і нулів можна безпосередньо перейти до моделювання функціонування системи в середовищі Simulink. Для цього активізуємо Simulink і відкриваємо вікно створення нової моделі, в яке переносимо з вікна браузера бібліотеки такі блоки Simulink: передавальні функції Transfer Fcn (Simulink/Continuous), Рис. 8. Модель САР швидкості обертання вала електродвигуна елементи порівняння Sum (Simulink/Math Operations), джерело одиничного скачка напруги Step (Simulink/Sources) та осцилоскоп Scope для спостереження часових залежностей (Simulink/Sinks). Після налагодження блоків і створення ліній між блоками одержимо модель, зображену на рис. 8. Виконуємо установку параметрів моделювання, відкриваємо осцилоскоп (подвійним натиском лівої кнопки миші при курсорі, розташованому в зоні осцилоскопа Scope) та одержуємо графік перехідної характеристики.

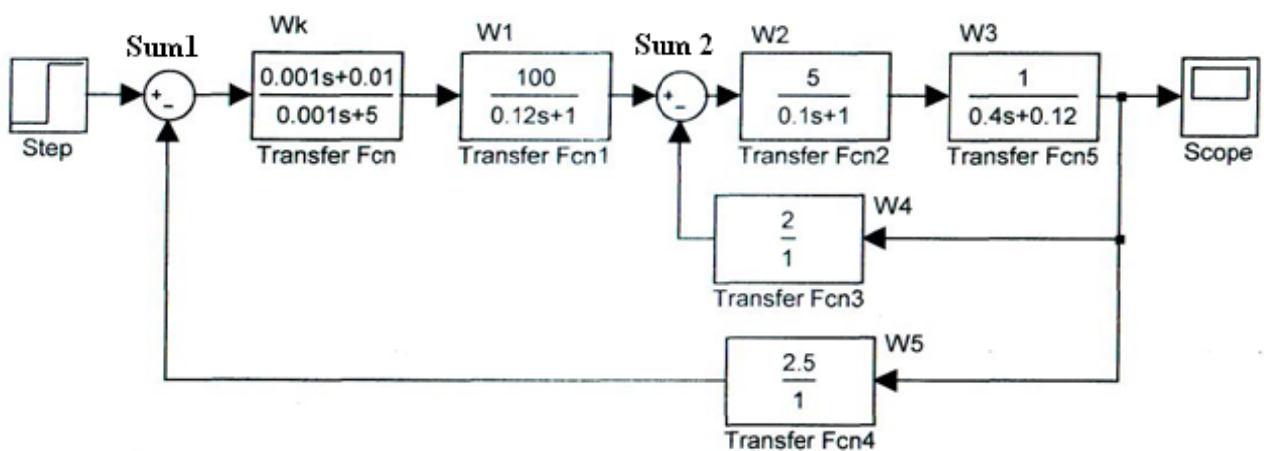


Рис. 8. Модель передавальної функції Transfer Fcn

## Контрольні запитання

1. Ціль і задачі синтезу.
2. Призначення структурної схеми.
3. Як створити математичну модель ланки САР?
4. Як одержати математичну модель САР?
5. Програмові засоби САПР для проектування та аналізу САР, їх можливості.
6. Дати визначення скрипту САР
7. Аналіз стійкості САР за допомогою скрипту
8. Роль Simulink при вирішенні задач САПР.

## Практичне заняття 4

Тема заняття: **Побудова кореневого годографа САР.**

Зміст заняття:

1. Полюси та нулі САР, кореневий годограф САР.
2. Команди Matlab, що використовуються при побудові кореневого годографа.
3. Скрипт побудови кореневого годографа.
4. Оцінка стійкості САР за допомогою кореневого годографа.

Виконання завдання

### 1. Аналіз стійкості САР за допомогою кореневого годографа

Стійкість систем автоматичного керування залежить від розташування полюсів і нулів передавальної функції. Якщо передавальна функція  $W(s) = \frac{p(s)}{q(s)}$ , то корені характеристичного рівняння  $q(s)=0$  називаються полюсами, а корені полінома  $p(s)=0$  називаються нулями. При зміні одного з параметрів системи одержують послідовність точок, що відповідають положенням коренів характеристичного рівняння. Указані точки описують кореневий годограф САР. Кореневий годограф – це траєкторії коренів характеристичного рівняння системи на комплексній площині при зміні одного з параметрів системи. Наприклад, якщо змінювати коефіцієнт підсилення замкнутої системи  $K$ , то при  $K=0$  корені характеристичного рівняння співпадають з полюсами  $W(s)$ , а при  $K=\infty$  корені співпадають з нулями  $W(s)$ . При зміні  $K$  від 0 до  $\infty$  траєкторії коренів характеристичного рівняння починаються в полюсах і закінчуються в нулях.

Від положення коренів залежить поведінка системи в часі. Тому годограф дає змогу одержати якісну інформацію про сталість і динамічні показники системи.

2. На рис. 9 показана структурна схема замкнутої САР, що складається з двох послідовно з'єднаних ланок  $W1$  і  $W2$ . Передавальні функції ланок мають такі значення:

$$W1 = \frac{K(p+1)}{(p+2)}; \quad W2 = \frac{1}{p^2+2p+4}.$$

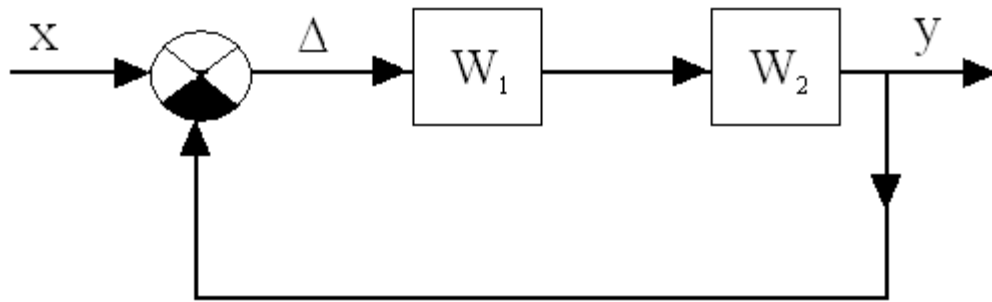


Рис. 9. Замкнута САР

За допомогою команди Matlab «series» знаходимо еквівалентну передавальну функцію  $W_p$  розімкненої системи. Передавальну функцію замкнутої системи одержуємо за допомогою команди «feedback». Обчислення полюсів системи виконуємо за допомогою команди «pole». Команда «zero» дає змогу обчислювати нулі передавальної функції замкнутої САР.

3. Розрахунок і запис передавальної функції виконуємо за допомогою m-файла типу скрипт, що приведений нижче. Кореневий годограф одержуємо шляхом зміни коефіцієнта підсилення САР,  $K$ , який змінюється в межах від 0 до 20 з кроком 0,5. Розрахунок передавальних функцій ланок, обчислення полюсів і нулів САР при зміні  $K$  виконується в тілі циклу for – end. Побудова графіків у лінійному масштабі по обох осях здійснюється за допомогою функції plot.

### **% Побудова кореневого годографа САР**

%Замкнута САР складається з двох послідовно з'єднаних ланок  $W_1$  і  $W_2$ ,

% які охоплені жорстким одиничним зв'язком

clear % задаємо значення коефіцієнта підсилення САР;

$K=[0:0.05:20];$

% цикл для визначення траєкторії коренів характеристичного рівняння;

for  $i=1:\text{length}(K)$

%запис передавальної функції першої ланки САР;

$\text{num}W_1=K(i)*[1 \ 1]; \text{den}W_1=[1 \ 2]; W_1=\text{tf}(\text{num}W_1, \text{den}W_1);$

%запис передавальної функції другої ланки САР;



```

numW2=[1]; denW2=[1 2 4]; W2=tf(numW2, denW2);
%перехідна характеристика розімкнутої САР;
Wp=series(W1, W2);
%перехідна характеристика замкнутої САР;
Wz=feedback(Wp, 1);
    p(:,i)=pole(Wz); % обчислення полюсів;
z(:,i)=zero(Wz); % обчислення нулів;
if i==1
    p1=pole(Wz),z1=zero(Wz)
end
if i==20
    p2=pole(Wz), z2=zero(Wz)
end
end
% побудова траєкторії коренів САР;
plot (real(p), imag(p), 'x'), grid
xlabel('Дійсна вісь'), ylabel('Уявна вісь')

```

4. На рис. 10 та 11 приведені результати виконання скрипту. Аналізуючи приведені графіки приходимо до висновку, що всі корені САР «ліві», тобто система в заданих межах зміни  $K$  стійка. Система має три полюси і один нуль. При збільшенні  $K$  дві гілки кореневого годографа, що належать комплексним кореням відходять від дійсної осі і прямують до уявної осі. Третій корінь дійсний. Його траєкторія бере початок у точці дійсної осі – 1,14 і при збільшенні  $K$  прямує до нуля із значенням – 2.

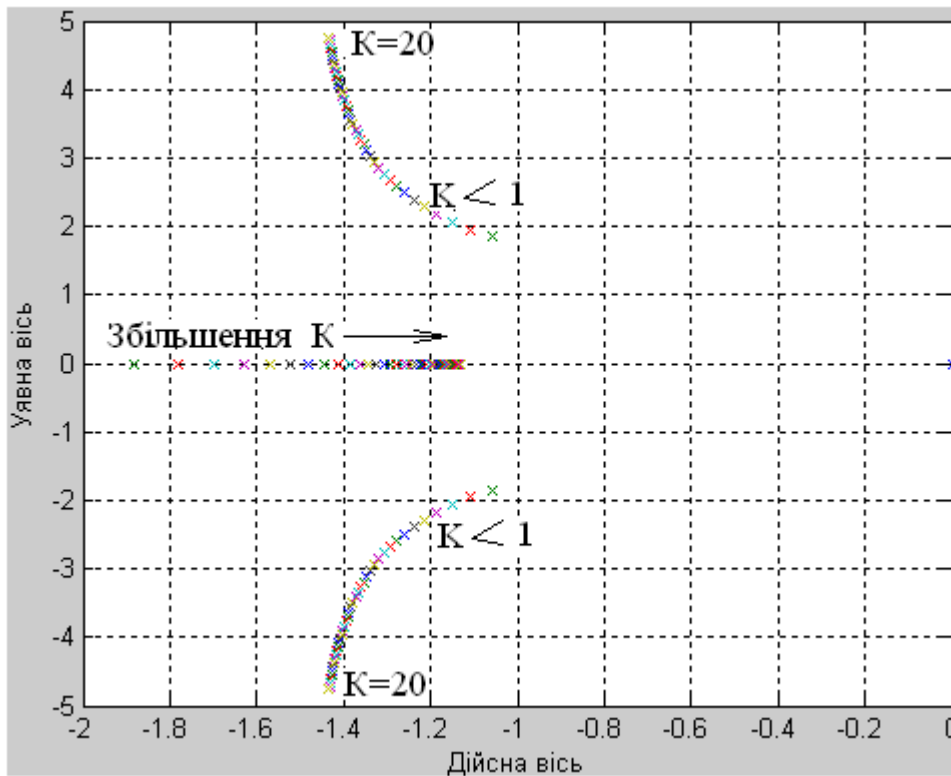


Рис. 10. Кореневий годограф САР

Розрахунок та побудову кореневого годографа можна виконати також за допомогою функції `glocus` Matlab. Для цього необхідно використати характеристичне рівняння замкнутої системи, структурна схема якої приведена на рис.9. Передавальна функція замкнутої системи

$$W_3 = \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2}.$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи  $1 + W_1 W_2 = 0$  покажемо у вигляді

$$1 + K \frac{(p+1)}{(p+2)(p^2+2p+4)} = 0,$$

де  $K$  – змінюється в діапазоні  $0 < K < \infty$ .

Скрипт побудови кореневого годографа за допомогою функції `glocus` приведений нижче.

```
% Побудова кореневого годографа САР за допомогою функції glocus;
%Замкнута САР складається з двох послідовно з'єднаних ланок W1 і W2,
% які охоплені жорстким одиничним зв'язком;
clear
% характеристичне рівняння замкнутої САР;
% 1+K*{(p+1)/(p+2)(p^2+2p+4)}
```

```

%запис передавальної функції характеристичного рівняння;
g=[1 1]; q=[1 4 8 8]; sys=tf(g,q)
% побудова кореневого годографа;
rlocus(sys)

```

Результати побудови приведені на рис.11.

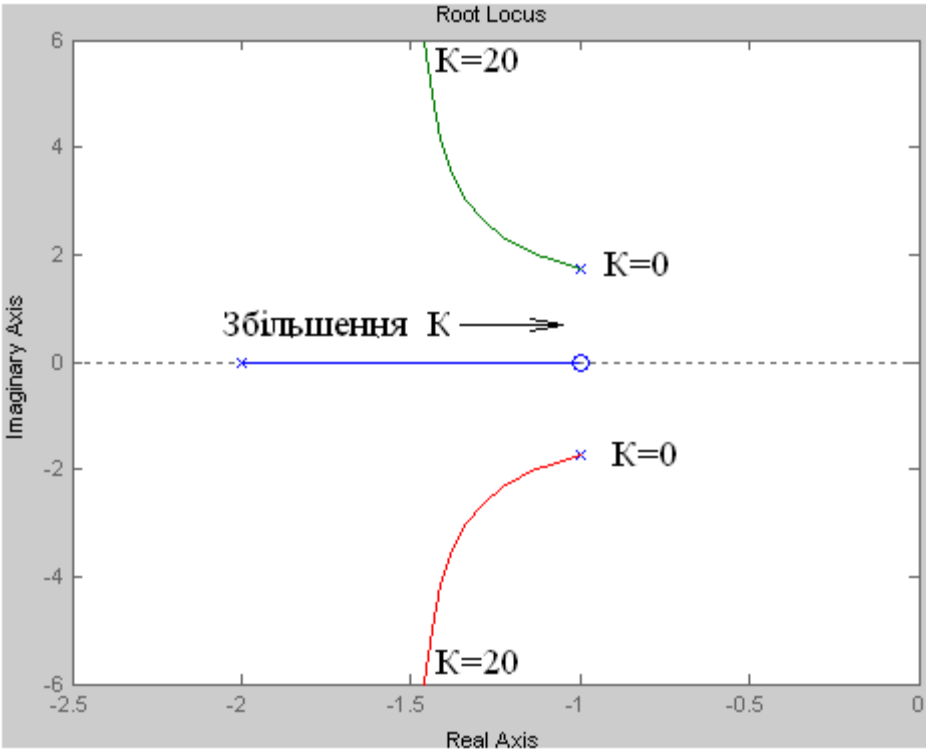


Рис.11. Графік розташування нулів і полюсів САР

На рис.11 полюси умовно позначені через « x », а нулі – через « o ».

Контрольні запитання

1. Дати визначення полюсів та нулів САР.
2. Дати визначення кореневого годографа.
3. Як змінюється положення коренів характеристичного рівняння САР при зміні коефіцієнта підсилення від 0 до  $\infty$ ?
4. Як за допомогою скрипта вивести на друк значення полюсів і нулів?
5. Зв'язок між стійкістю САР і кореневого годографом.

Практичне заняття 5

Тема заняття: *Оцінка стійкості САК за допомогою логарифмічної амплітудно-частотної характеристики та перехідної функції*

Зміст заняття:

1. Частотні критерії стійкості САР.
2. Вплив коефіцієнта підсилення системи на стійкість.
3. Вплив коефіцієнта підсилення системи на характер перехідного процесу.
4. Оцінка якості процесу регулювання

Виконання завдання

1. До частотних критеріїв стійкості належать критерії Михайлова, Найквіста, метод логарифмічних частотних характеристик і метод перехідних функцій.

Стійкість САК методом логарифмічних частотних характеристик оцінюють по точках, у яких логарифмічна фазова частотна характеристика ЛФЧХ розімкнутої системи  $\varphi_p(\omega)$  перетинає прямі  $-\pi, -3\pi, -5\pi, \dots$  в області частот, де ЛАЧХ  $L_p(\omega) > 0$ .

#### Формулювання критерію стійкості:

САР стійка у розімкненому стані, буде стійкою і у замкненому стані, якщо ордината ЛФЧХ на частоті зрізу системи за абсолютною величиною менша, ніж  $180^\circ$ , тобто, якщо

$$|\varphi(\omega_{зр})| < 180^\circ.$$

Запас стійкості за фазою визначається як різниця між  $180^\circ$  і абсолютним значенням аргумента  $\varphi(\omega_{зр})$  на частоті зрізу, тобто  $\Delta\varphi = 180^\circ - |\varphi(\omega_{зр})|$ .

Запас стійкості за амплітудою  $\Delta L$  визначається ординатою ЛАЧХ при частоті, в якій ЛФЧХ перетинає рівень  $-\pi$ .

2. При збільшенні загального коефіцієнта підсилення  $K$  ЛАЧХ системи, не змінюючи форми, зміщується вправо і зона  $L_p(\omega) > 0$  розширюється і при деякому критичному коефіцієнті  $K_{кр}$  система буде на межі стійкості. При подальшому збільшенні  $K$  ЛАЧХ ще більше зміститься вправо і САК стане нестійкою. Запас стійкості за фазою та запас стійкості за коефіцієнтом підсилення будуть зменшуватись і зрештою можуть прийняти від'ємні значення.

3. Диференціальне рівняння замкненої системи в операційній формі для нульових початкових умов

$$[D(p) + K]\bar{\varphi} = K\bar{g}.$$

По закінченні перехідного процесу ( $p=0$ ) при  $t = \infty$  рівняння набирає вигляду:  $(1 + K)\varphi = Kg$ , а коефіцієнт підсилення замкнутої системи

$$K_{\text{зам}} = \frac{\varphi_{\text{ст}}}{g} = \frac{K}{1 + K},$$

де  $\varphi_{\text{ст}}$  – вихідна величина в усталеному режимі

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{K}{K + 1}g.$$

Похибка регулювання в усталеному режимі при х.х.:

$$\Delta\varphi = g - \varphi_{\text{ст}} = g - \frac{K}{K + 1}g = \frac{1}{1 + K}g.$$

Таку систему називають статичною. Останній вираз свідчить, що збільшення коефіцієнта підсилення системи сприяє зниженню похибки регулювання.

4. До перехідних процесів САК крім стійкості пред'являють цілу низку інших вимог, які прийнято називати показниками якості. Основні критерії оцінки якості керування:

1. Характер перехідного процесу оцінюють за видом перехідної функції  $h(t)$ , який може бути монотонним, аперіодичним або коливним.
2. Час регулювання  $t_p$  (час перехідного процесу) – це час, протягом якого, починаючи з моменту появи впливу  $l(t)$  на систему, відхилення перехідної функції  $h(t)$  від її сталого значення  $h(\infty)$  буде менше наперед заданої величини  $\varepsilon$ . Помилка в сталому режимі (стала помилка)  $\Delta_c = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta(t)$  характеризує відхилення  $h(t)$  при  $t = \infty$  від величини одиничного вхідного впливу.
3. Перерегулювання  $\sigma$  – максимальне відносне відхилення перехідної функції  $h(t)$  від сталого значення, в %.
4. Крутість переднього фронту перехідної функції оцінюється часом досягнення максимального відхилення та часом зміни функції від 10 до 90 % сталого значення.
5. Інтенсивність коливання оцінюється такими показниками: а) числом коливань регульованої величини за час регулювання  $t_p$ , яке визначається числом мінімумів кривої  $h(t)$  за час  $t_p$ ;  
б) швидкістю затухання. Для процесу з коливанням швидкість затухання оцінюють за логарифмічним декрементом затухання  $d = \ln(\Delta h_{\text{дI}} / \Delta h_{\text{дII}})$ , де  $\Delta h_{\text{дI}}, \Delta h_{\text{дII}}$  – два послідовних максимуми кривої  $h(t)$ .  
На практичному занятті при допомозі пакета MATLAB Control System необхідно провести аналіз і дослідження замкнутої САК, структурна схема якої приведена на рис. 12. Значення передавальних функцій системи прийняти такими:

$$W_1(p) = \frac{K(p+2)}{(p+1)}, \quad W_2(p) = \frac{1}{p^2+2p+4}.$$

Коефіцієнт підсилення САК у процесі дослідження повинен приймати значення  $K=20,10,5$ . Тривалість процесу дослідження прийняти рівною 10 сек.

Розробку математичної моделі САК, визначення та аналіз її динамічних характеристик виконувати за допомогою MATLAB. Для цього необхідно скористатись скриптом, що приведений нижче.

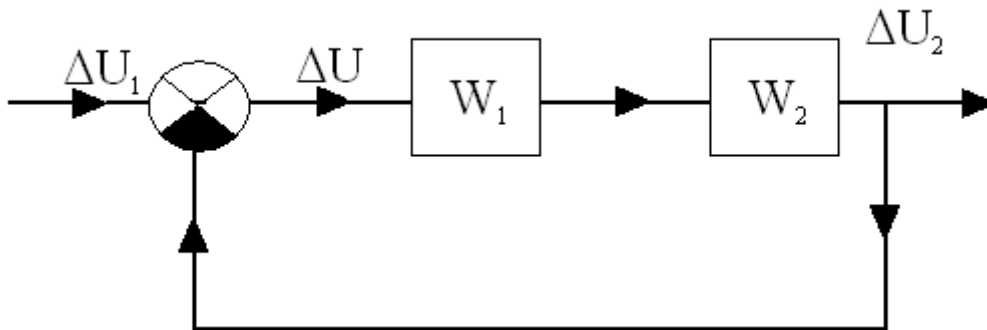


Рис. 12. Структурна схема замкнутої САК

Скрипт аналізу динамічних характеристик замкнутої САК.

Стійкість САК оцінюється методом частотних характеристик

%Задаємо час початку, кінця процесу та крок зміни часу, с

`t=[0:0.01:10];`

%Задаємо діапазон зміни частоти в логарифмічному масштабі

`w=logspace(0, 1, 200);`

%Задаємо три значення коефіцієнта підсилення K

`K=[20, 10, 5];`

%запис циклу для побудови частотних характеристик

`for i=1:3`

%початок циклу

%запис передавальної функції першої ланки САК

`numgc=K(i)*[1 2]; dengc=[1 1]; gc=tf(numgc, dengc);`

%запис передавальної функції другої ланки САК

`numg=[1]; deng=[1 2 4]; g=tf(numg, deng); Wp=series(gc, g);`

```

%перехідна характеристика розімкнутої САР
Wz=feedback(Wp,1),
%перехідна характеристика замкнутої САР
[mag, phase,w]=bode(Wz, w); [Gm, Pm, Wcg, Wcp]=margin(Wz);
%обчислення запасів стійкості по модулю і фазі
y(:, i)=step(Wz, t);
% обчислення перехідної характеристики
subplot(4, 1, i), bode(Wz, w), grid
% обчислення логарифмічної характеристики
%позначення на діаграмі запасів стійкості
title(['Gm= ', num2str(Gm),' Pm= ', num2str(Pm), ' Wcg= ', num2str(Wcg),' Wcp=',
num2str(Wcp)]), hold on end
% кінець циклу
% побудова графіків перехідних характеристик subplot(4, 1, i+1), plot(t, y(:,1),
t, y(:,2), t, y(:,3)), grid xlabel('Частотарад/с'); ylabel('Амплітуда'), grid on,

```

Треба проаналізувати отримані результати розрахунків і графіки та зробити висновок відносно стійкості розімкнутої та замкнутої САР, а також охарактеризувати якість процесу регулювання САР.

#### Контрольні питання

1. Перелік частотних критеріїв стійкості САР.
2. Формулювання критеріїв стійкості методо-логарифмічних частотних характеристик.
3. Як впливає збільшення коефіцієнта підсилення на стійкість САР?
4. Як впливає коефіцієнт підсилення та похибку регулювання у встановленому режимі?
5. Перелік критеріїв оцінки якості регулювання.

#### Практичне заняття 6

Тема заняття: ***Побудова схеми перетворювача з використанням засобів AutoCAD.***

Зміст заняття:

1. Вивчення основних команд AutoCAD.

2. Налаштування графічного редактора.
3. Створення файлу креслення.

#### Виконання завдання

1. Програмові засоби AutoCAD та технічні можливості обчислювальної техніки дозволяють перейти від традиційних методів конструювання до нових інформаційних технологій з використанням ЕОМ і створювати системи автоматизації розробки та виконання конструкторської документації, яка задовольняє стандартам ЕСКД. Практична робота полягає у виготовленні двовимірного креслення за допомогою програмових засобів AutoCAD. Перед тим, як розпочати креслення, треба виконати налаштування графічного редактора. Насамперед треба визначити розміри креслення, тобто його межі. Для цього слід виконати команду **ЛИМИТЫ** і відповісти на її запитання. Команда **ЛИМИТЫ** дозволяє змінити верхню та нижню межі креслення при роботі з ним, а також вмикає і вимикає контроль виходу креслення за поточні межі. Щоб у становленні межі були відображені на екрані, варто скористатися з команди **ZOOM ALL**.

Далі необхідно задати кількість знаків після коми при визначенні координат X та Y у статусному рядку. Це робить команда **ЕДИНИЦЫ (UNITS)**.

Команда **СЕТКА (GRID)** дозволяє ввімкнути чи вимкнути сітку з крапок на екрані і задати відстань між цими крапками. Команда **СЕТКА** керує відображенням на екрані сітки крапок, що полегшує розміщення об'єктів на кресленні.

Команда **ШАГ (SNAP)** дає змогу змінити крок, з яким змінюються координати. Щоб курсор миші плавно рухався по екрану, треба натиснути **F9**. Можна змінити крок або зовсім відмовитися від «прив'язки». Формат команди:

**SNAP** Шаг прив'язки чи Вкл/Откл/Аспект/Поворот/Стиль <1>: .

Команда **ОРТНО** керує режимом «ортогонального» креслення. У цьому режимі можливо креслити лише вертикальні та горизонтальні відрізки, полілінії та смуги.

#### 2. Налаштування графічного редактора.

Перед тим, як розпочати креслення, необхідно виконати налаштування графічного редактора. Щоб створити рисунок використовуємо шаблон acad.dwt,. Щоб відкрити файл шаблону, треба виконати такі кроки:

1. З меню Файл (File) виберіть Новый (New).
2. У діалоговому вікні Select Template (по шаблону) у полі **Вибір Шаблону** виберіть файл acad.dwt і натисніть Open. AutoCAD відкриває новий креслярський файл, використовуючи acad.dwt установки шаблону.



**Установка середовища креслення** Шаблон містить установки таких налаштувань:

- одиниці (десятькове число і т. д.); – обмеження (межі креслярського аркуша);
- допомога у кресленні (Snap, Grid, Ortho);
- шари;
- типи лінії;
- розмір паперу.

Для встановлення одиниць, формату і допомоги у кресленні, потрібно:

1. З меню **Формат** (Format) виберіть **ЕДИНИЦЬ** (UNITS).
  2. У діалоговому вікні **Управление Единицами Измерения** (Units) виберіть 0.00 під **Точностью** (Precision), і потім натисніть ОК.
  3. У меню **Формат** (Format), натисніть **Drawing Limits** (межі креслення) і в командній строчці на запит *Specify lower left corner or[ON/OFF<0.00,0.00>]* натисніть Enter, щоб прийняти значення координат 0.00,0.00 нижнього лівого кута креслення по умовчання. На запитання відносно координати правого верхнього кута креслення введіть розміри формату А4: *Specify upper right corner<0.00,0.00>:210,297*. Для введення команд завжди необхідно натискати **Enter**.
3. У строчці режимів увімкніть кнопку **Сетка** (Grid). У контекстному меню кнопки (позиція Settings , вкладка Snap and Grid) необхідно встановити значення: Snap X spacing: 0,5 та Grid X spacing 10 після чого натиснути **Enter**. На цьому налаштуванні можна припинити, а щоб зберегти всі зроблені налаштування, треба з меню Файл (File), вибрати пункт Сохранить (Save) і надати ім'я файла.
- Щоб побачити результати налаштування необхідно увімкнути кнопку Сетка (Grid) та змінити розмір вікна області креслення до його границь командою **Зуммировать всё** (Zoom All). Сітка при цьому поширюється до меж креслення.

### **Створення файла креслення**

За допомогою системи AutoCAD необхідно виконати у форматі А4 електричну схему регулятора напруги системи автоматичного управління, яка приведена на рис. 13. Для цього з панелі інструментів Рисование (Draw) вибирають необхідні команди для створення елементів рисунка. При виконанні креслення рекомендовано дотримуватись правил ЕСКД стосовно умовного позначення котушок індуктивності, дроселів,

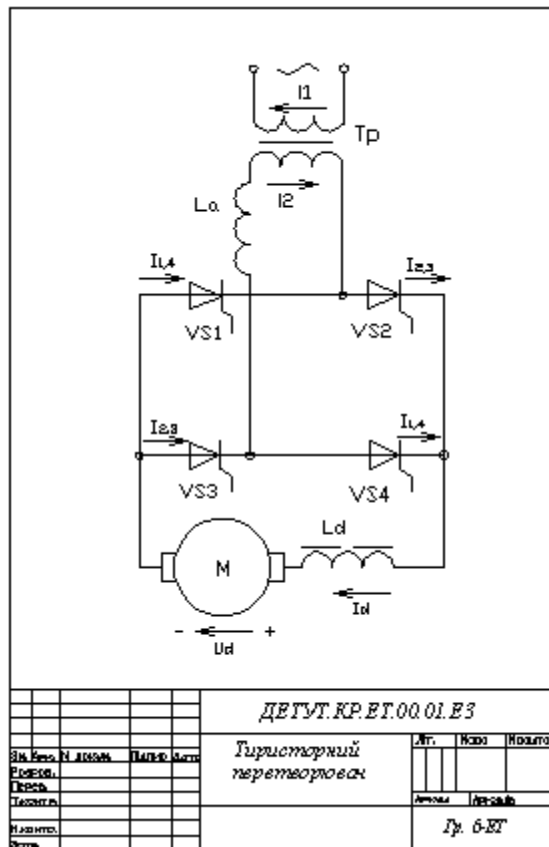


Рис.13. Креслення принципової схеми перетворювача

трансформаторів (ГОСТ 2.723-68), приладів напівпровідникових (ГОСТ 2.730-73) та машин електричних (ГОСТ 2.722-68).

Креслення складається з відрізків, дуг, кіл та інших графічних об'єктів, які в системі AutoCAD носять назву примітивів. Примітиви вводять командами, які визивають за допомогою кнопок панелі інструментів або з падаючого меню **Draw** (Рисование). При побудові ліній електричних з'єднань необхідно увімкнути режим ортогональності кнопкою **ORTHO**. При цьому AutoCAD починає корегувати відрізки, що вводяться до вертикальності або до горизонтальності. Кнопка **POLAR** вмикає режим, який дає змогу проводити лінії під заданим кутом, який може налагоджуватись. Режим прив'язки, що вмикається кнопкою **OSNAP** (Прив'язка) дає змогу безпомилково визначати необхідні точки (кінець відрізка, центр кола, середина відрізка та ін.), через які мають проходити примітиви, що будують.

Операції редагування дають змогу змінювати геометричну форму примітивів, переміщувати, подовжувати, вкорочувати, копіювати деталі та об'єкти та ін. Команди редагування вводять відповідними кнопками інструментальної панелі **Modify** (Редагування) або з падаючого меню **Modify**. Надписи можна створювати за допомогою команд **TEXT** (Текст) або **MTEXT** (Мультитекст). Перша створює прості однорядкові надписи, а друга – багаторядкові, в яких можна змінювати висоту, нахил тексту, міжрядковий інтервал, ширину, стиль та ін. Команда **TEXT** може бути введена кнопкою «**AI**» панелі інструментів, а

також з падаючого меню **Draw** (Малювання), де в пункті **Text** є підпункт **Single Line Text** (Однорядковий). Команду **MTEXT** кнопкою «А» панелі інструментів та з падаючого меню **Draw** (Малювання), де в пункті **Text** є підпункт **Mytiline Text**.

Побудову електричної схеми регулятора напруги системи автоматичного управління необхідно виконати у відповідності з кресленням, приведеним у кінці даного розділу.

#### Контрольні запитання

1. Де розташований рядок режимів і які кнопки до нього належать?
2. Способи введення команд в AutoCAD.
3. Як створити новий файл у заданому форматі?
4. Як здійснюється побудова основних примітивів?
5. Як здійснюється редагування примітивів об'єктів?
6. Створення однорядкових і багаторядкових надписів.

### Рекомендована література

1. Автоматизация электроподвижного состава: Учебник для вузов ж.д.транспорта /А. Н. Савоськин, Л. А. Баранов. – М.: Транспорт, 1990. -311 с.
2. Преобразовательная техника. В. С. Руденко, В. И. Сенько – Киев.: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Mathcad 12. Самоучитель. Е. Р. Алексеев – М .: НТ Пресс, 2005. – 345 с.
4. Matlab 6/6.1/6.5 Simulink 4/5 в математике и моделировании. Дьяконов В. П. – М.: СОЛОН – Пресс.-2003.- 570 с.
5. Полищук Н. Н. Самоучитель AutoCAD, 2002. – Спб.: БХВ – Петербург, 2002. – 608 с.

*Навчальне видання*

Юрій Федорович ДУБРАВІН

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ ТА САПР

Методичні вказівки  
щодо підготовки та виконання практичних занять для студентів спеціальності  
7.092202 «Електричний транспорт», спеціалізація  
«Електровози та електропоїзди»  
усіх форм навчання

*Відповідальний за випуск Ю. Ф. Дубравін*

*Директор РВВ ДЕТУТ Л. В. Пономаренко*

*Головний редактор О. В. Ємець*

*Верстка В. О. Андрієнка*

---

Підписано до друку 12. 04. 2010.  
Формат – 60x84/16. Папір офсетний.  
Спосіб друку – ризографія.  
Наклад 60 прим. Замовлення № 37-2/10.

---

Надруковано в редакційно-видавничому відділі  
Державного економіко-технологічного університету транспорту.  
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 3079 від 27.12. 2007 р.  
03049, м. Київ 49, вул. Миколи Лукашевича, 19