

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра агроінженерії

02-07-29М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з дисципліни «Електротехніка, електрообладнання та засоби автоматизації» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННМІ
Протокол № 2 від 02 жовтня 2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Електротехніка, електрообладнання та засоби автоматизації» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Пилипака Т. С., Василюк С. В., Голотюк М. В., Налобіна О. О., Бундза О. З. – Рівне : НУВГП, 2024. – 38 с.

Укладачі: Пилипака Т. С. – к.т.н., доцент кафедри агроінженерії; Василюк С. В. – д.т.н., професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій; Голотюк М. В. – к.т.н., доцент кафедри агроінженерії; Налобіна О. О. – д.т.н., професорка, завідувачка кафедри агроінженерії; Бундза О. З. – к.т.н., доцент кафедри агроінженерії.

Відповідальний за випуск: Налобіна О. О., доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри агроінженерії

Керівник групи забезпечення спеціальності
Бундза Олег Зіновійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії

Попередня версія 04-03-233

© Т. С. Пилипака,
С. В. Василюк,
М. В. Голотюк,
О. О. Налобіна,
О. З. Бундза, 2024
© НУВГП, 2024

Практичне заняття 1.
"Розрахунок кола змінного струму з паралельним з'єднанням віток"

Завдання. Для кола з паралельним з'єднанням елементів, яке під'єднане до змінної синусоїдної напруги $u = U_m \sin \omega t$ з лінійною частотою $f = 50 \text{ Гц}$ (рис.1) необхідно:

1. Накреслити розрахункову електричну схему (рис.1.1).
2. Визначити струм джерела живлення і струми в окремих вітках кола.
3. Побудувати векторну діаграму струмів і розкласти вектори струмів на їхні активні і реактивні складові.
4. Визначити активну (P), реактивну (Q) і повну потужність кола.
5. Визначити коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) кожної гілки, коефіцієнт потужності джерела енергії і відповідні фазові кути струмів $\varphi; \varphi_1; \varphi_2$ і φ_3 .

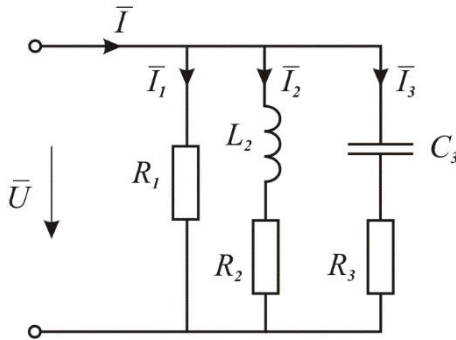


Рис.1.1.

Вихідні значення:

$U_0; B$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$L_2, Гн$	$C_3, мкФ$
110	50	30	25	0,17	220

Розв'язок.

2. Загальний струм в електричному колі при паралельному з'єднанні гілок визначають за формулою

$$I = UY = U\sqrt{(\sum g_i)^2 + (\sum \epsilon_{Li} - \sum \epsilon_{Ci})^2},$$

де $Y = 1/Z$ - загальна повна провідність кола;

$$\sum g_i = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_{L2}^2} + \frac{R_3}{R_3^2 + X_{C3}^2};$$

Для цього спочатку знайдемо реактивні опори віток:

$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,17 = 53,4 \text{ (Ом)};$$

$$X_{C3} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 220 \cdot 10^{-6}} = 14,47 \text{ (Ом)};$$

Тоді активні провідності віток будуть рівні:

$$g_1 = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ (См)}; \quad g_2 = \frac{30}{30^2 + 53,4^2} = 0,008 \text{ (См)};$$

$$g_3 = \frac{25}{25^2 + 14,47^2} = 0,03 \text{ (См)};$$

$$g_{\text{екв}} = \sum g = 0,02 + 0,008 + 0,03 = 0,058 \text{ (См)}.$$

а реактивні провідності віток будуть рівні:

$$\sum \epsilon_{Ci} = \frac{X_{C2}}{R_3^2 + X_{C3}^2} \sum \epsilon_{Li} = \frac{X_{L2}}{R_2^2 + X_{L2}^2}$$

або:

$$b_{L2} = \frac{53,4}{30^2 + 53,4^2} = 0,0142 \text{ (См)}; \quad b_{C3} = \frac{14,47}{25^2 + 14,47^2} = 0,017 \text{ (См)};$$

$$b_{\text{екв}} = b_L - b_C = 0,0142 - 0,017 = 0,0031 \text{ (См)}.$$

Тоді повна провідність другої вітки буде рівною:

$$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_{L2}^2} = 0,016 \text{ (См)}.$$

А повна провідність третьої вітки:

$$Y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_{C3}^2} = 0,035 \text{ (См)}.$$

Повна провідність всього кола:

$$Y = \sqrt{g_{\text{екв}}^2 + b_{\text{екв}}^2}.$$

Тоді струми віток будуть визначатися за формулами:

$$I_1 = U \cdot Y_1 = U \cdot g_1 = 2,2 \text{ (A)}; I_2 = U \cdot Y_2 = 1,8 \text{ (A)}; I_3 = U \cdot Y_3 = 3,8 \text{ (A)}.$$

А струм у нерозгалуженій ділянці кола буде рівний:

$$I = U \cdot Y = 6,38 \text{ (A)}.$$

3. Для побудови векторної діаграми струмів необхідно визначити фазові кути струмів віток за формулами:

$$\cos \varphi_1 = \frac{g_1}{Y_1} = 1 \rightarrow \varphi_1 = 0^0;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{g_2}{Y_2} = 0,49 \rightarrow \varphi_2 = \arccos(0,49) = -60,7^0;$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{g_3}{Y_3} = 0,86 \rightarrow \varphi_3 = \arccos(0,86) = 30^0;$$

$$\cos \varphi = \frac{g_{\text{екв}}}{Y} = 0,99 \rightarrow \varphi = \arccos(0,99) = 3^0.$$

Побудову можна спростити ,якщо струми в вітках розкласти на активну і реактивну складові:

$$I_{1a} = I_1 = 3,8 \text{ (A)};$$

$$I_{2a} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 0,88 \text{ (A)}; I_{2p} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = -1,57 \text{ (A)}.$$

$$I_{3a} = I_3 \cdot \cos \varphi_3 = 3,3 \text{ (A)}; I_{3p} = I_3 \cdot \sin \varphi_3 = 1,9 \text{ (A)}.$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = 6,37 \text{ (A)}; I_p = I \cdot \sin \varphi = 0,34 \text{ (A)}.$$

Тоді за виконаними розрахунками побудуємо векторну діаграму струмів:

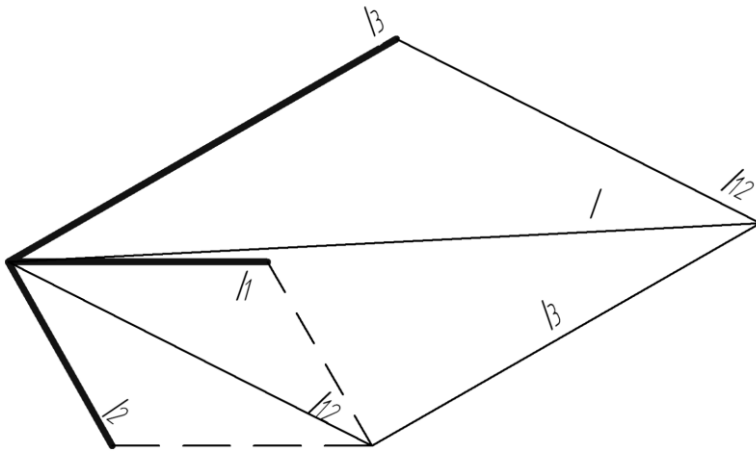


Рис.1.2. Векторна діаграма струмів.

4. Визначаємо потужності кола:

а) Активну: $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 701,3(Bm)$;

б) Реактивну: $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = 37,6(BAp)$;

в) Повну: $S = U \cdot I = 702,3(BA)$.

Для наочності зобразимо трикутник потужностей:

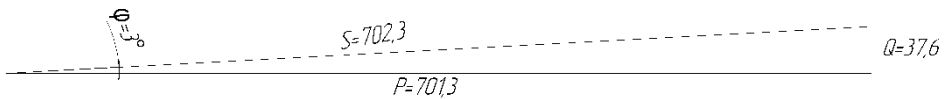


Рис.1.3. Трикутник потужностей

Домашнє завдання. Виконати розрахунки пунктів 1-5 по вихідних даних таблиці 1.1. та таблиці 1.2.

Таблиця 1.1.

Одиниці у шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Діюче значення напруги U, B	127	220	380	660	220	380	127	660	220	380

Таблиця 1.2.

Десятк и В шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_1, Ом$	30	2	15	25	35	40	60	55	55	45
$R_2, Ом$	80	70	60	50	40	30	75	65	45	55
$R_3, Ом$	20	40	50	45	65	75	15	25	30	55
$L_2, Гн$	0,1 5	0,2	0,2 5	0,3	0,2	0,2 5	0,3	0,1 5	0,3 5	0,2 5
$C_3,$ $мкФ$	200	25 0	300	70 0	40 0	350	45 0	150	100	200

Практичне заняття 2. "Розрахунок системи запалювання"

Завдання. На рис.2.1. зображена схема заміщення батарейної системи запалювання бензинових двигунів. Первинна обмотка котушки запалення (КЗ) під'єднана до акумуляторної батареї (G) через переривач (SA), який шунтований конденсатором C_1 . Активний опір первинної обмотки R_1 , її індуктивність L_1 , число витків обмотки W_1 .

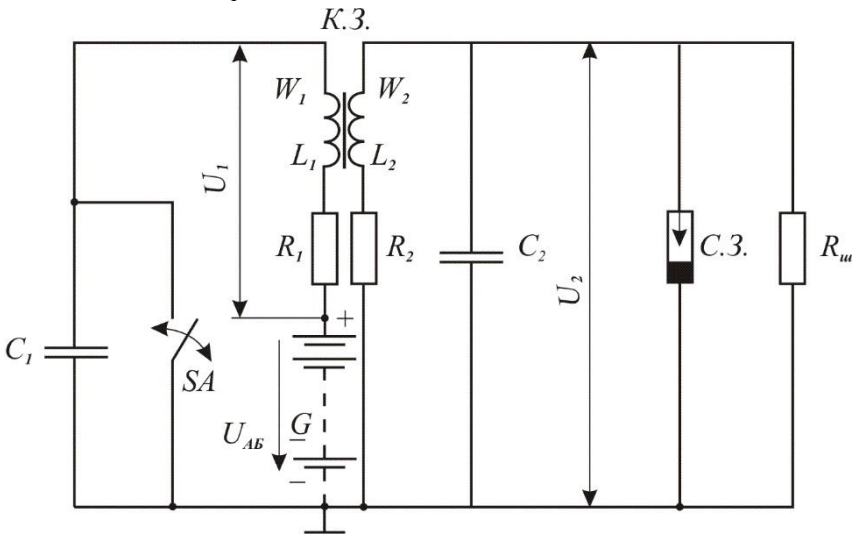


Рис.2.1

Вторинна обмотка котушки запалення з числом витків W_2 , активним опором R_2 і індуктивністю L_2 , зашунтована ємністю C_2 , створює на свічках запалення (СЗ) напругу U_2 . R_u - активний опір, обумовлений нагаром на поверхні свічки запалення, який шунтує іскровий проміжок свічок запалення. Котушка запалювання К.З являє собою своєрідний трансформатор, який підвищує напругу U_1

первинної обмотки до напруги вторинної обмотки U_2 .

В завданні необхідно:

1. Розрахувати перехідний струм первинної обмотки котушки запалення $i_1(t)$ при вмиканні цієї обмотки на затискачі акумуляторної батареї (або автомобільного генератора) \underline{G} . Розрахунок виконати відповідно до схеми заміщення системи запалення рис.2.2.

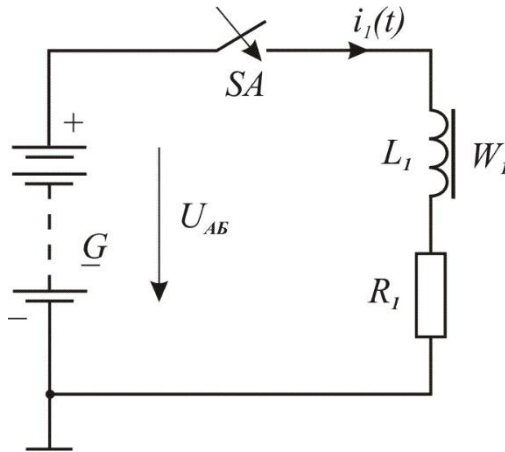


Рис.2.2

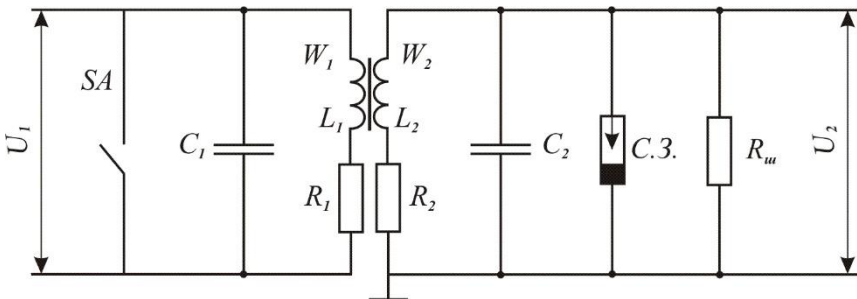


Рис.2.3

2. Розрахувати енергію магнітного поля $W_{L1}(t)$, створеного струмом $i_1(t)$.

3. Побудувати графіки залежностей $i_1(t)$ і $W_{L1}(t)$.

4. Визначити період часу T , що відповідає частоті спрацювання циліндрів двигуна (оберти колінчастого валу n і кількість циліндрів Z задані в табл.2.2).

5. Визначити час замкнутого стану контактів переривача SA при заданій швидкості обертання n

6. Визначити величину струму в первинній обмотці i_p і енергію магнітного поля $W_{L1}(t)$ в момент розриву контакту SA (див. рис.2.2).

7. Розрахувати сумарну енергію електричного поля ємнісних елементів C_1 і C_2 і вторинну напругу U_2 котушки запалювання в момент розриву контактів переривача SA (див. рис. 2.3.).

8. Пояснити, чому напруга $U_2 = (15 \div 30) \cdot 10^3 B$, яка виникає на вторинній обмотці котушки запалення і на свічках запалення не являється небезпечною для людини, тоді як в електричних силових мережах небезпечною вважається напруга $U_m \geq 42B$.

Вихідні дані.

Е.Р.С.; В	13,5
R_1 ; Ом	2,1
L_1 ; мГн	10,0
W_1	330
R_2 ; кОм	8,0
L_2 ; мГн	46
W_2	23000
C_1 ; мкФ	0,3
C_2 ; пФ	40
Число циліндрів, Z	4
Частота обертання колінвала, об/хв	1000

Розв'язок.

1. Перехідний струм первинної обмотки котушки запалювання розраховується за формулою:

$$i_1(t) = \frac{U_{AB}}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1}{L_1}t} \right) = 6,43(1 - e^{-210t}), (A);$$

2. Енергія магнітного поля $W_{L1}(t)$, створеного струмом $i_1(t)$ буде визначатися за формулою:

$$W_{L1} = L_1 \frac{(i_1(t))^2}{2} \quad (2.1.)$$

Максимального значення енергія магнітного поля буде досягати після завершення перехідного процесу (при $\left[e^{-\frac{R_1}{L_1}t} \right] = 1$) і чисельно

буде рівною:

$$W_{L1\max} = \frac{L \left(\frac{U_{AB}}{R_1} \right)^2}{2} = 0,2066(\text{Дж}).$$

3. Графіки $i_1(t)$ і $W_{L1}(t)$ будемо для значень часу t в межах від $t=0$ до $t=5 \cdot \frac{L_1}{R_1}$, оскільки протягом даного часу триває перехідний

процес перетворення електричного струму в енергію магнітного поля котушки запалювання. Тоді час перехідного процесу буде рівний:

$$t = 5L_1/R_1 = 0,0238\text{с}.$$

Підставляючи в формулу (2.1) значення часу від 0 до 0,0238 с, будемо графіки $i_1(t)$ і $W_{L1}(t)$ (рис.2.1., рис.2.2.)

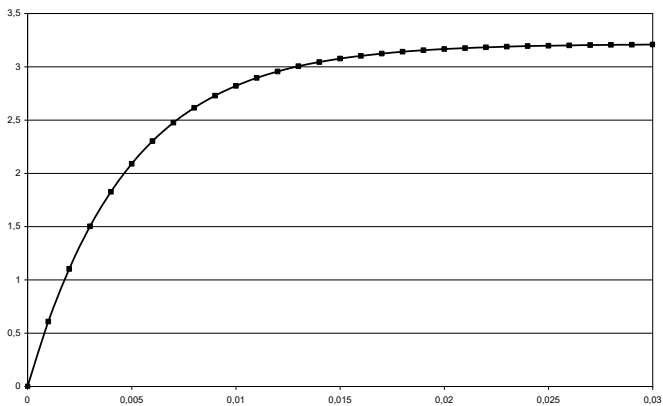


Рис.2.1.1. Графік перехідного процесу наростання струму в котушці запалювання $i_1(t)$.

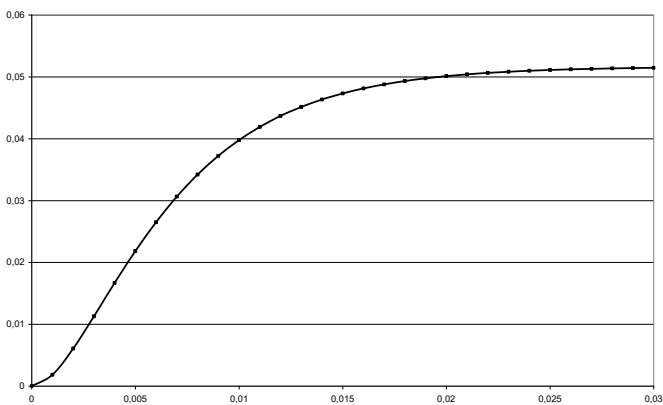


Рис.2.1.1. Графік перехідного процесу наростання енергії магнітного поля в котушці запалювання $W_{L1}(t)$.

4. Тривалість періоду T , що відповідає частоті спрацювання циліндрів можна визначити за формулою:

$$T = \frac{120}{nZ} = 0,03, \text{ с}$$

$$\text{або } f = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} = 33,3, \text{ (Гц)}.$$

$$f = \frac{1}{T}$$

де $n \text{ об/хв}$ - частота обертання колінчастого вала двигуна;

Z - число циліндрів двигуна;

f - частота замикань контактів пеперивача SA .

5. Час замкнутого стану контактів переривача t_3 приймаємо рівним:

$$t_3 = (0,6 \div 0,65) \cdot T = 0,0188, \text{ (с)}.$$

6. Величина струму i_p первинної обмотки КЗ в момент розмикання контактів SA визначаємо за формулою:

$$i_p = \frac{U_{AB}}{R_1} \left(1 - e^{-R_1/L_1 \cdot t_3} \right) = 6,3 \text{ (А)}.$$

7. Сумарну енергію електричного поля ємнісних елементів C_1 і C_2 і вторинну напругу U_2 котушки запалювання в момент розриву контактів переривача SA розраховуємо за формулами:

$$W_{C1} + W_{C2} = W_{L1P}$$

$$C_1 \frac{U_1^2}{2} + C_2 \frac{U_2^3}{2} = L_1 \frac{i_{1p}^2}{2} \text{ де } U_1 = \frac{W_1}{W_2} U_2;$$

$$U_{2p} = i_{1p} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 + C_2}} \cdot \eta, \text{ де } i_{1p} - \text{ струм первинної обмотки}$$

котушки запалення в момент її розмикання.

$\frac{W_1}{W_2} = K_T$ - коефіцієнт трансформації котушки запалення,

$\eta = 0,75 - 0,85$ - коефіцієнт, який враховує зменшення вторинної напруги U_2 , яка прикладена до свічки запалення, внаслідок теплових втрат в котушці запалення.

$$U_{2p} = 6,3 \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-6} (330/23000)^2 + 40 \cdot 10^{-9}}} \cdot 0,8 = 50000(B);$$

Сумарна енергія електричного поля ємнісних елементів:

$$W_{C1} + W_{C2} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 6,3^2}{2} = 0,2(Дж).$$

Домашнє завдання.

Виконати розрахунки пунктів 1-7 по вихідних даних таблиць 2.1. та 2.2.

Таблиця 2.1.

Одиниці в шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Е.Р.С акумуляторної батареї або генератора	12,5	12,5	14	24	13,8	24	24	24	14	14
R_1 ; Ом	1,9	3,2	1,55	0,8	0,5	0,72	0,4	0,72	0,45	0,45
L_1 ; мГн	9,5	10,5	7,5	5,5	4,3	5,7	3,1	5,7	5,8	3,75
W_1	330	302	268	260	225	260	180	260	115	198
R_2 ; кОм	8,6	7,7	6,5	15,6	11	15,7	22	15,7	6,35	4,5
L_2 ; мГн	47	45	34	87	28	84	180	84	29	23,5
W_2	22500	23600	20800	38600	20250	30000	41000	30000	3000	16300
C_1 ; мкФ	0,3	0,2	0,25	0,35	0,17	0,2	0,35	0,4	0,3	0,2
C_2 ; пФ	40	45	50	56	37,3	56	34	56	24,4	31,3

Таблиця 2.2.

Десятки в шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Число циліндрів Z	4	4	4	4	6	6	6	6	8	8
Частота обертання колінвалу, об/хв	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	2000

Практичне заняття 3.

"Розрахунок бортової електричної мережі транспортного засобу"

Завдання. Розрахувати бортову електричну мережу транспортного засобу, схема заміщення якої зображена на рис.1.1 (в робочому режимі) і на рис.3.2 (в режимі стартерного пуску).

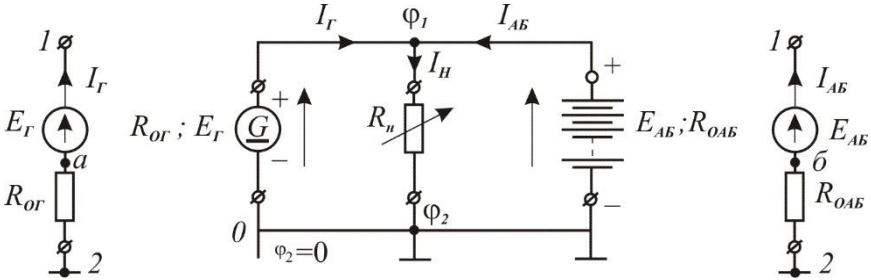


Рис.3.1.

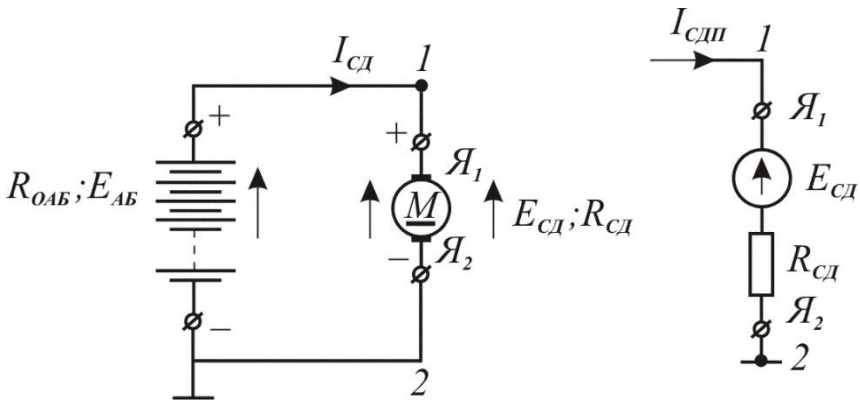


Рис.3.2.

На схемах заміщення позначено:

G - автомобільний генератор, як електромеханічне джерело електричної енергії постійного струму;

E_G - електрорушійна сила генератора;

R_{OG} - внутрішній опір генератора;

E_{AB} - акумуляторна батарея, як електрохімічне джерело

електричної енергії постійного струму;

R_{OAB} - внутрішній опір акумуляторної батареї;

R_H - споживачі електричної енергії автомобіля;

M - стартерний електродвигун автомобіля;

R_{CD} - опір кола якоря стартерного електродвигуна;

E_{CD} - електрорушійна сила стартерного двигуна (проти

– Е.Р.С.), яка залежить від швидкості обертання його якоря (n).

Вихідні значення:

E_G ; B	R_{OG} ; Om	E_{AB} ; B	R_{OAB} ; Om	R_H ; Om	$R_{ст.д}$; Om	$n_{ст.д}$; об/хв	C_e ; В/об/хв
13,8	0,11	11	0,01	1	$12 \cdot 10^{-3}$	1000	10^{-2}

Необхідно виконати наступні розрахунки:

1. Скласти рівняння за законами Кірхгофа для визначення струмів у колі рис.1.
2. Розрахувати струми гілок кола: I_G ; I_{AB} ; I_H .
3. Розрахувати напругу бортової мережі U_{12} методом двох вузлів.
4. Визначити в якому режимі працює акумуляторна батарея: в режимі заряджання чи в режимі розряджання.
5. Скласти баланс потужності в електричному колі рис.1.
6. Розрахувати коефіцієнт корисної дії генератора (механічними втратами генератора знехтувати).
7. Визначити струм якоря стартерного електродвигуна в двох режимах:
 - а) в момент пуску ($n_{n_d} = 0$);
 - б) при його обертанні з заданою швидкістю $n \text{ об/хв}$.
8. Визначити напругу бортової мережі автомобіля при стартерному пуску в режимах „а” і „б”.

Розв'язок.

1. Рівняння за законом Кірхгофа складають відносно невідомих струмів: I_G ; I_H і I_{AB} , тобто треба скласти три рівняння. Одне рівняння складається за першим законом Кірхгофа, а два інших за другим законом. Для цього схему, зображену на рис.1. перерисуємо у наступному вигляді:

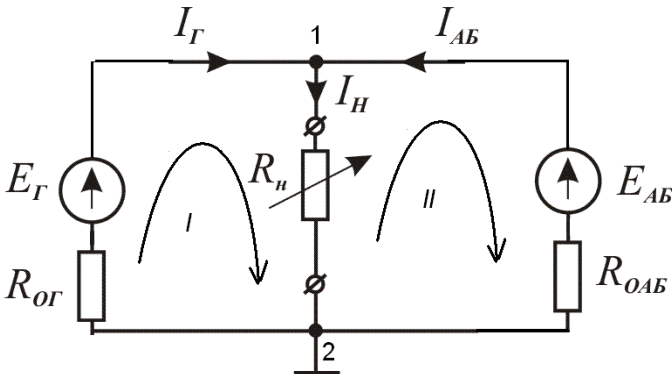


Рис.3.3.

при цьому позначивши на схемі вузли 1 і 2, та контури I і II, і вибравши довільно напрямки обходу контурів та напрямки протікання струмів.

Для 1-го вузла можемо записати:

$$I_G + I_{AB} - I_H = 0;$$

для I-го контуру:

$$I_G R_{0G} + I_H R_H = E_G;$$

для II-го контуру:

$$-I_{AB} R_{0AB} - I_H R_H = -E_{AB}.$$

2. Щоб знайти значення струмів, підставимо в записані рівняння (п.1) числові значення:

$$I_{\Gamma} + I_{AB} - I_H = 0$$

$$0,11I_{\Gamma} + 0 + 1 \cdot I_H = 13,8$$

або в матричному вигляді :

$$0 - 0,01I_{0AB} - 1 \cdot I_H = -11$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0,11 & 0 & 1 \\ 0 & 0,01 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 13,8 \\ -11 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Розв'язавши рівняння (1), отримаємо: $I_{\Gamma}=26,9$ (A); $I_{AB}=-16,1$ (A); $I_H=10,8$ (A).

3. Згідно методу двох вузлів, напруга між вузлами 1 і 2 буде визначатися за формулою:

$$U_{12} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} \quad (2)$$

$$\text{де } E_1 = E_{\Gamma}; E_2 = E_{AB}; g_1 = \frac{1}{R_{0\Gamma}}; g_2 = \frac{1}{R_{0AB}}; g_3 = \frac{1}{R_H}.$$

$$\text{Таким чином } U_{12} = \frac{13,8 \cdot \frac{1}{0,11} + 11 \cdot \frac{1}{0,01}}{\frac{1}{0,11} + \frac{1}{0,01} + 1} = 11,1 \text{ (В).}$$

Даним методом можна також визначити струми у вітках за законом Ома:

$$I_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma} - U_{12}}{R_{0\Gamma}}; I_H = \frac{U_{12}}{R_H}; I_{AB} = \frac{E_{AB} - U_{12}}{R_{0AB}}.$$

4. Знак "-" у значенні I_{AB} означає, що в дійсності напрям протікання струму протилежний від обраного. Тобто акумуляторна батарея працює в режимі заряджання.

5. В будь-якому електричному колі повинен підтверджуватися баланс потужностей (як частковий випадок загального закону природи – закон збереження енергії), який полягає в тому, що алгебраїчна сума потужностей всіх джерел енергії $P_E = \sum EI$ дорівнює арифметичній

сумі потужностей, які розсіюються на всіх резистивних елементах кола $P_Q = \sum RI^2$ (P_Q - електрична потужність на резистивних елементах кола, яка перетворюється в тепло відповідно до закону Джоуля-Ленца).

Рівняння балансу потужностей для кола рис.1 має вигляд

$$E_r \cdot I_r + E_{AB} I_{AB} = R_{0r} I_r^2 + R_{0AB} I_{AB}^2 + R_H I_H^2$$

Потужність джерел: $13,8 \cdot 26,9 - 11 \cdot 16 = 194,5$ (Вт);

Потужність споживачів: $26,9^2 \cdot 0,11 + 16^2 \cdot 0,01 + 10,8^2 \cdot 1 = 199$ (Вт);

Таким чином, $194,5 \approx 199$ баланс потужностей виконується.

Потужність АБ дорівнює $P_{AB} = E_{AB} I_{AB}$ і якщо E_{AB} і I_{AB} напрямлені однаково, то $P_{AB} > 0$ (режим розрядження АБ), а коли E_{AB} і I_{AB} мають протилежні напрями, то $P_{AB} < 0$ (режим зарядження АБ).

6. Коефіцієнт корисної дії генератора (без врахування механічних втрат в генераторі) визначається за формулою:

$$\eta_G = \frac{U_{12} I_G}{E_G \cdot I_G} = \frac{11,1 \cdot 26,9}{13,8 \cdot 26,9} = 80,6\%$$

7. Електричне коло, яке відповідає стартерному пуску двигуна внутрішнього згорання від акумуляторної батареї, зображено на рис.2, як просте коло постійного струму, яке можна розрахувати за законом Ома.

7 а) В момент вмикання стартерного двигуна ($n = 0$) за законом Ома пусковий струм:

$$I_{CD,II} = \frac{E_{AB}}{R_{0AB} + R_{CD}} = \frac{11}{0,01 + 12 \cdot 10^{-3}} = 627,3 \text{ (А)}$$

7 б) Коли стартерний двигун приходить в рух, маючи оберти „ n_{CD} ”, в обмотці якоря відповідно за законом електромагнітної індукції Фарадея наводиться (індукується) електрорушійна сила E_{CD} , яка направлена проти електрорушійної сили акумуляторної батареї E_{AB} .

Тоді по закону Кірхгофа струм I_{CD} при обертанні якоря стартера зі швидкістю $n_{CD} \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ дорівнює

$$I_{CD} = \frac{E_{AB} - E_{CD}}{R_{0AB} + R_{CD}} = \frac{E_{AB} - C_e n_{CD}}{R_{0AB} + R_{CD}} = \frac{11 - 10 \cdot 1000}{0,01 + 0,012} = 45,45 \text{ (A)}$$

Так як $E_{CD} = C_e n_{CD}$,

(де $C_e \frac{\text{В}}{\text{об}/\text{хв}}$ - коефіцієнт пропорційності між електрорушійною

силою E_{CD} і швидкістю обертання якоря n_{CD}), то по мірі розгону СД струм якоря I_{CD} , рівний струму АБ зменшується.

Напруга електричної мережі автомобіля в момент пуску СД ($n_{CD} = 0$) дорівнює $U_{12П} = E_{AB} - R_{0AB} \cdot I_{CDП} = 11 - 0,01 \cdot 627,3 = 4,72 \text{ (В)}$

Після розгону СД напруга мережі залежить від швидкості обертання статорного двигуна (n_{cd}) і коефіцієнта C_e (n_{cd} і C_e задані в табл.2).

Домашнє завдання.

Виконати розрахунки пунктів 1-8 по вихідних даних таблиці 3.1 та таблиці 3.2.

Таблиця 3.1.

Одиниц і у шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_{Г}; B$	14	14	13	13	14,2	14,2	14	14	13	13
$R_{ОГ};$ $Ом$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
$E_{АБ}; B$	12,5	12,5	12,5	12,4	12,3	12,2	12	12	11, 5	11, 5
$R_{ОАБ};$ $Ом$	0,01	0,01	0,01	0,012	0,012	0,012	0,011	0,011	0,01	0,01
$R_{Н}; Ом$	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,75	2	1,2	1,2

Таблиця 3.2.

Десятки у шифрі	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_{ст.д}; Ом$	$12 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$
$n_{ст.д}; об/хв$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$C_{с}; В/об/хв$	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}

Практичне заняття 4. "Підбір асинхронного двигуна для приводу механізму"

Завдання.

1. Вибрати електричний двигун з табл. 1 для приводу механізму, який працює в режимі зі змінним навантаженням. Діаграма навантаження на валу двигуна $M = f(t)$, наведена до ступінчастої форми і задана в вигляді таблиці 1 і 2. Частота обертання вала не регулюється і при холостому ході двигуна близька до синхронної швидкості $n_c = 1000 \text{ об/хв}$.

2. За технічними даними вибраного двигуна (з табл. 1) побудувати в масштабі його механічну характеристику $n = f(M)$. 3. З механічної характеристики $n = f(M)$ визначити швидкість обертання двигуна для його навантаженні найбільшим і найменшим моментом відповідно навантажувальній діаграмі $M = f(t)$.

4. Перевірити вибраний двигун на перевантажувальну здатність при зменшенні напруги в електричній мережі на 10%.

Вихідні дані:

M1	M2	M3	M4	t1	t2	t3	t4
80	40	60	60	60	200	90	0

Розв'язок.

1. Будуємо навантажувальну діаграму, згідно з вихідними даними:

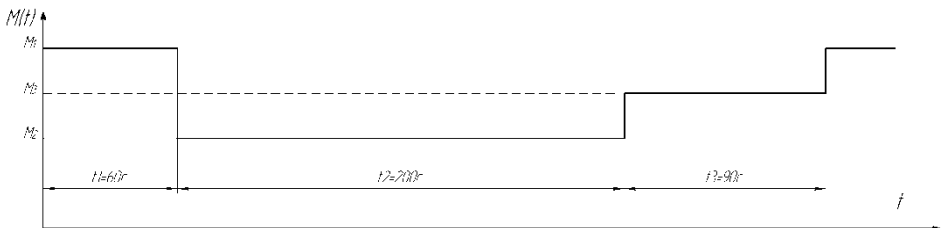


Рис. 4.1. Навантажувальна діаграма $M=f(t)$

2. Оскільки асинхронні двигуни в робочому режимі працюють з постійним магнітним потоком і їхній електромагнітний обертовий момент M можна приблизно вважати пропорційним струму статора і ротора, то допустимо вибрати двигун по величині еквівалентного моменту M_E за тривалість циклу його роботи для заданої навантажувальної діаграми $M = f(t)$ за формулою:

$$M_E = \sqrt{\frac{t_1 M_1^2 + t_2 M_2^2 + t_3 M_3^2 + t_4 M_4^2}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} H \cdot M = 54,2 \text{ (н}\cdot\text{м)}.$$

Так, як синхронна швидкість двигуна задана $n_c = 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$, що відповідає числу полюсів обмотки статора $2p = 6$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$, то еквівалентна потужність двигуна P_E , яка відповідає визначеному еквівалентному моменту, дорівнює:

$$P_E = \frac{M_E}{9,55} = 5,67 \text{ (кВт)} = 5670 \text{ (Вт)}.$$

3. Номінальна потужність двигуна P_n вибирається з додатку 4.1 з умови $P_n \geq P_E$ при $n_c = 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

Обираємо двигун типорозміру 4A132M6У3 та виписуємо його вихідні дані з додатку 4.1

$P_{2\text{ном}}$, кВт	η_n , %	$\cos \varphi_n$	m_{Π}	m_M	m_K	$S_{\text{ном}}$, %	S_K , %	i_{Π}
7,5	85,5	0,81	2,0	1,8	2,5	3,2	26,0	6,0

де:

P_n - номінальна потужність кВт;

η_n - номінальний коефіцієнт корисної дії %;

$\cos \varphi_n$ - номінальний коефіцієнт потужності;

$m_n = \frac{M_n}{M_{\Pi}}$ - кратність пускового моменту;

$$m_M = M_M / M_H \text{ - кратність мінімального моменту;}$$

$$m_K = M_K / M_H \text{ - кратність критичного моменту;}$$

s_H - номінальне ковзання;

s_K - критичне ковзання;

$$i_{II} = \frac{I_{II}}{I_H} \text{ - кратність пускового струму.}$$

4. Для побудови механічної характеристики $n = f(M)$ знайдемо значення обертів та крутних моментів двигуна в характерних точках:

а) Номінальні:

Номінальна швидкість обертання двигуна:

$$n_H = n_c (1 - s_H) = 1000(1 - s_H) = 100(1 - 3,2 \cdot 10^{-2}) = 968 \text{ (об/хв);}$$

$$\text{номінальний крутний момент: } M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H} = 74 \text{ (н}\cdot\text{м)}.$$

б) Критичні:

$$n_{кр} = 1000(1 - s_K); M_K = m_K M_H$$

$$n_{кр} = 1000(1 - 0,26) = 740 \text{ (об / хв);}$$

$$M_{кр} = 185 \text{ (н}\cdot\text{м)}.$$

в) Мінімальні:

$$n_M = 300 \text{ об/хв} \quad M_M = M_H m_M = 133 \text{ (н}\cdot\text{м)}$$

г) Пускові:

$$n_{II} = 0; M_M = M_H m_{II} = 148 \text{ (н}\cdot\text{м)}$$

За розрахованими даними будуюмо механічну характеристику:

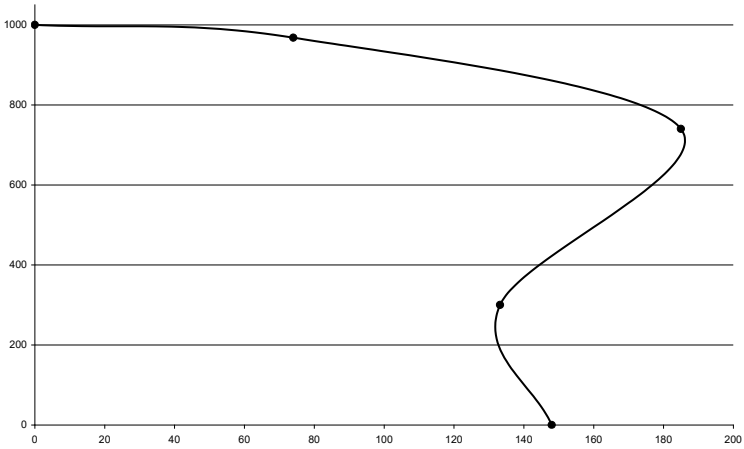


Рис.4.2. Механічна характеристика $n=f(M)$.

7. Перевантажувальна здатність двигуна перевіряється з умови додання двигуном максимального моменту сил опору на його валу при зниженні напруги живлення на 10% , тобто при $U = 0,9U_H$.

Так як обертовий момент двигуна M пропорційний U^2 , то при зниженні напруги на 10% критичний (максимальний) момент двигуна зменшується на 19% , тобто

$$M_{кр0,9} = 0,81M_{кр} = 150(\text{н}\cdot\text{м})$$

Умова перевірки вибраного двигуна на перевантажувальну здатність визначають за формулою

$$0,81 \cdot M_{кр} \geq M_{\max} ,$$

де M_{\max} - максимальний гальмівний на валу двигуна із графіка $M = f(t)$ рис.1.

$$M_{\max} = 80(\text{н}\cdot\text{м})$$

Таким чином, обраний двигун задовольняє нас по перевантажувальній здатності.

Домашнє завдання. Підібрати асинхронний двигун та виконати розрахунки пунктів 1-6 і побудувати навантажувальну діаграму та механічну характеристику по вихідних даних таблиць 1,2.

Типорозмір електро- двигуна	$P_{2ном}$ кВт	η_H %	$\cos \varphi_H$	m_{II}	m_M	m_K	$S_{ном}$, %	S_K , %	i_{II}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4AA63A6Y3	0,18	56,0	0,62	2,2	1,5	2,2	11,5	55,5	3,0
4AA63B6Y3	0,25	59,0	0,62	2,2	1,5	2,2	10,8	62,5	3,0
4A71A6Y3	0,37	64,5	0,69	2,0	1,8	2,2	9,2	49,0	4,0
A;71B6Y3	0,55	67,5	0,71	2,0	1,8	2,2	10,0	49,0	4,0
4A80A6Y3	0,75	69,0	0,74	2,0	1,6	2,2	8,4	37,0	4,0
4A80B6Y3	1,1	74,0	0,74	2,0	1,6	2,2	8,0	38,0	4,0
4A90LY3	1,5	75,0	0,74	2,0	1,7	2,2	6,4	31,0	4,0
4A100L6Y3	2,2	81,0	0,73	2,0	1,6	2,2	5,1	25,5	5,0
4A112MA6Y3	3,0	81,0	0,76	2,0	1,8	2,5	4,7	37,0	6,0
4A112MB6Y3	4,0	82,0	0,81	2,0	1,8	2,5	5,1	38,0	6,0
4A132S6Y3	5,5	85,0	0,80	2,0	1,8	2,5	3,3	36,0	6,0
4A132M6Y3	7,5	85,5	0,81	2,0	1,8	2,5	3,2	26,0	6,0
4A160S6Y3	11,0	86,0	0,86	1,2	1,0	2,0	2,7	15,0	6,0
4A160M6Y3	15,0	87,5	0,87	1,2	1,0	2,0	2,6	14,0	6,0
4A180M6Y3	18,5	88,0	0,87	1,2	1,0	2,0	2,4	13,5	6,0
4A200M6Y3	22,0	90,0	0,90	1,3	1,0	2,4	2,3	13,5	6,5
4A200L6Y3	30,0	90,5	0,90	1,3	1,0	2,4	2,1	13,5	6,5
4A225M6Y3	37,0	91,0	0,89	1,2	1,0	2,3	1,8	11,5	6,5
4A250S6Y3	45,0	91,5	0,89	1,2	1,0	2,1	1,4	9,0	6,5
4A250M6Y3	55,0	91,5	0,89	1,2	1,0	2,1	1,3	9,5	6,5

4A280S6Y3	75,0	92,0	0,89	1,2	1,0	2,2	2,0	8,3	7,0
-----------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Домашнє завдання. Підібрати асинхронний двигун та виконати розрахунки пунктів 1-6 і побудувати навантажувальну діаграму та механічну характеристику по вихідних даних таблиць 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1.

Одиниці в шифрі Моменту, H_m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_1	20	100	150	200	240	60	220	180	40	80
M_2	70	60	90	130	150	110	160	90	90	40
M_3	100	80	120	160	110	130	90	150	70	60
M_4	50	40	60	70	80	40	60	80	100	60

Таблиця 4.2.

Десятки в шифрі Час, c	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_1	0	40	50	60	70	80	0	30	50	40
t_2	200	180	160	200	0	120	200	0	180	140
t_3	150	0	120	90	140	0	60	180	0	50
t_4	90	210	0	0	80	160	70	90	120	0

Практичне заняття 5.

"Розрахунок компенсаційної конденсаторної батареї"

Найбільш поширеними видами компенсуючих пристроїв, які виконують роль місцевих генераторів реактивної потужності на підприємствах, є батареї статичних конденсаторів і синхронні двигуни. Конденсаторні батареї встановлюють на цехових загальнозаводських трансформаторних підстанціях - з боку низької або високої напруги.

Чим ближче компенсуючий пристрій до приймачів реактивної енергії, тим більше ланок системи електропостачання розвантажується від реактивних струмів. Однак при централізованій компенсації, тобто при установці конденсаторів на трансформаторних підстанціях, конденсаторна потужність використовується більш повно.

Потужність конденсаторних батарей може бути визначена по діаграмі рис. 5.1.

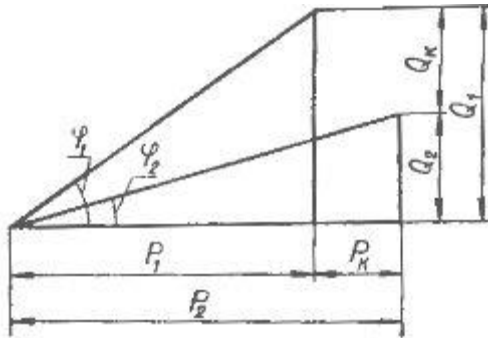


Рис.5.1. Діаграма потужностей

де P_1 і P_2 - навантаження до і після компенсації,

φ_1 і φ_2 - відповідні кути зсуву фаз.

Реактивна потужність, що віддається компенсуючою установкою:

$$Q = Q_1 - Q_2, \quad (5.1)$$

де Q_1 і Q_2 - реактивна потужність до і після компенсації.

Активна потужність, споживана з мережі компенсуючим пристроєм:

$$P_K = P_2 - P_1 \quad (5.2.).$$

Величину необхідної потужності конденсаторної батареї можна визначити наближено без врахування втрат в конденсаторах, які складають $0,003 - 0,0045 \text{ кВт} / \text{кВАр}$

$$Q_k = P (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad (5.3.)$$

Завдання. Визначити номінальну потужність Q_k конденсаторної батареї (рис.5.2.), необхідної для підвищення коефіцієнта потужності до значення 0,95 на підприємстві з трьохзмінним рівномірним графіком навантаження. Середньодобова витрата електроенергії $A_a = 9200 \text{ кВт}\cdot\text{год}$; $A_p = 7400 \text{ кВАр}\cdot\text{год}$. Конденсатори встановлені на напругу 380 В.

Необхідно:

1. Нарисувати схему ввімкнення конденсаторної батареї трикутником на напругу 380 В.;
2. Визначити середньодобове навантаження, кВт;
3. Розрахувати $tg\varphi_1$ та $tg\varphi_2$;
4. Розрахувати номінальну потужність Q_k конденсаторної батареї.
5. Вибрати з таблиці 5.1. трьохфазні конденсатори та порахувати їх число в конденсаторній батареї.

Розв'язок.

1. Схема вмикання компенсуючої конденсаторної батареї трикутником наведена на рис.5.2.

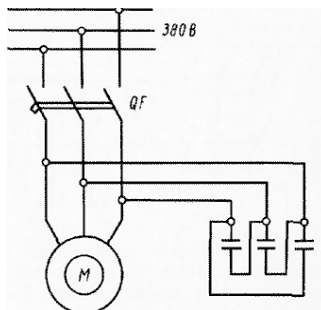


Рис.5.2. Схема вмикання компенсуючої конденсаторної батареї трикутником (380 В)

2. Розраховуємо середньодобове навантаження:

$$P_{cp} = \frac{A_a}{24} = \frac{9200}{24} = 384(\text{кВт}).$$

3. Розраховуємо $tg\varphi$:

$$a) \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{A_P}{A_A} = \frac{7400}{9200} = 0,8;$$

$$б) \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{(1 - \cos \varphi_2^2)}{\cos \varphi_2} = \frac{(1 - 0,95^2)}{0,95} = 0,32;$$

4. Розраховуємо потужність конденсаторних батарей:

$$Q_K = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 384(0,8 - 0,32) = 185(\text{кВАр}).$$

5. Вибираємо трифазні конденсатори типу КМ1-0,38-13 кожен номінальною потужністю 13 кВАр, на напругу 380 В. Число конденсаторів в батареї:

$$n = \frac{Q}{Q_H} = \frac{185}{13} = 14.$$

Таблиця 5.1. Технічні дані конденсаторних батарей

Тип батарей	$U_H, \text{кВ}$	$Q_H, \text{кВАр}$	$C, \text{мкФ}$	$I_H, \text{А}$
КМ1 – 0,22 – 4,5 – 343	0,22	4,5	296	20,5
КМ2 – 0,22 – 9 – 343	0,22	9	592	40,4
КС2 – 0,22 – 12 – 343	0,22	12	740	34,6
КС0 – 0,38 – 12,5 – 343	0,38	12,5	276	32,9
КМ1 – 0,38 – 13 – 343	0,38	13	286	34,1
КС1 – 0,38 – 14 – 343	0,38	14	309	31,9
КС1 – 0,38 – 16 – 343	0,38	16	353	42,1
КС1 – 0,38 – 20 – 343	0,38	20	441	52,6
КС2 – 0,38 – 28 – 343	0,38	28	618	73,6

Домашнє завдання. Виконати розрахунки пунктів 2-5 та підбір конденсаторної батареї для підвищення коефіцієнта потужності до 0,95 за вихідними даними таблиці 8.2. Числові значення A_A і A_P визначають, як середнє значення, що відповідають десяткам і одиницям шифру; номінальну напругу – по одиницях шифру. Наприклад, для шифру 05:

$$A_A = \frac{5000 + 10000}{2} = 7500(\text{кВт} \cdot \text{год});$$

$$A_P = \frac{1000 + 5000}{2} = 3000(\text{кВАр} \cdot \text{год});$$

$$U_H = 380(B).$$

Таблиця 5.2.

<i>Варіант</i>	<i>A_A, кВт·год</i>	<i>A_P, кВт·год</i>	<i>U_H, В</i>
0	5000	1000	220
1	6000	2000	380
2	7000	3000	220
3	8000	4000	380
4	9000	5000	220
5	10000	6000	380
6	11000	7000	220
7	12000	8000	380
8	13000	9000	220
9	14000	10000	380

Практичне заняття 6.

"Розрахунок двопівперіодного випрямляча змінного струму"

Завдання. Для двопівперіодної місткової схеми випрямлення і заданих вихідних даних необхідно:

1. Накреслити електричну схему двопівперіодного місткового випрямляча.

2. Визначити величину струму навантаження I_H .

3. Визначити середнє значення випрямленої напруги U_d .

4. Визначити величину вторинної обмотки трансформатора U_2 .

5. Визначити величину зворотної напруги $U_{зв.}$.

6. Підібрати випрямні діоди VD1-VD4. Для вибраних діодів вказати:

- Тип діода;

- максимальний допустимий (середній) прямий струм $I_{пр.макс.}$, A;

- максимально допустиму зворотну напругу $U_{зв.макс.}$, B;

- постійну (середню) пряму напругу $U_{пр.}$, B.

7. Визначити величину коефіцієнта пульсацій $k_{п.}$.

8. Визначити величину частоти пульсацій $f_{п.}$.

Вихідні дані:

$U=30$ (B);

$P_H=13$ (Вт).

Розв'язок.

1. Схема двопівперіодного випрямляча змінного струму матиме наступний вигляд:

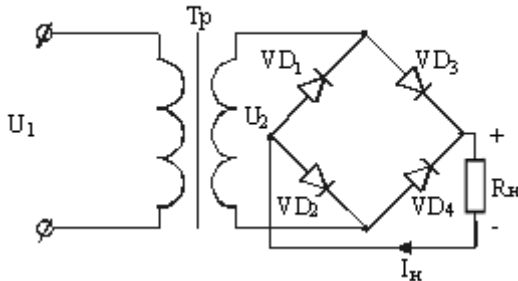


Рис.6.1. Принципова електрична схема двопівперіодного місткового випрямляча.

2. Струм навантаження визначається за формулою:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{13}{30} = 0,434(A).$$

3. Для визначення середнього значення випрямленої напруги за формулою:

$U_d = U_H + U_T + U_{VD}$, спочатку необхідно розрахувати:

а. Опір навантаження: $R_H = \frac{P_H}{I_H^2} = \frac{13}{0,434^2} = 900(Ом);$

б. Активний опір вторинної обмотки: $R_T = 0,075R_H = 900 \cdot 0,075 = 67,5(Ом);$

в. Спад напруги на опорі вторинної обмотки трансформатора: $U_T = I_H \cdot R_T = 0,434 \cdot 67,5 = 29,3(B);$

г. Опір діода. Для цього необхідно виконати його попередній вибір. Оберемо діод марки Д229К з наступними паспортними даними:

- Середній прямий струм: $I_{np, макс} = 0,7(A);$
- максимально допустима зворотна напруга $U_{зв, макс} = 300(B);$
- середня пряма напруга $U_{np} = 1(B);$

Тоді опір діода буде рівний: $R_{VD} = \frac{U_{np}}{I_{пр. макс}} = \frac{1}{0,7} = 1,43(Ом).$

А спад напруги на діоді:

$$U_{VD} = I_H \cdot R_{VD} = 0,434 \cdot 1,43 = 0,62(B).$$

Отже середнє значення випрямленої напруги буде рівним:

$$U_d = 30 + 29,3 + 0,62 = 59,9(B).$$

4. Для двопівперіодної місткової схеми випрямлення співвідношення між діючим значенням напруги та середнім значенням напруги становить:

$$U_d / U_2 = 0,9.$$

$$\text{Звідки } U_2 = \frac{U_d}{0,9} = \frac{59,9}{0,9} = 66,5(B).$$

5. Для двопівперіодної місткової схеми випрямлення зворотна напруга буде становити:

$$U_{36} = \sqrt{2}U_2 = 94,1(\text{В}).$$

6. Таким чином, попередньо обраний діод марки Д229К нам підходить. Якщо попередньо обраний діод не підходить (не достатня зворотна напруга), то необхідно обрати інший діод і повторити розрахунки пунктів 3г-5.

7. В загальному випадку коефіцієнт пульсацій це - відношення амплітуди першої (основної) гармоніки змінної складової випрямленої напруги до її середнього значення:

$$p = U_{1m} / U_d .$$

Часові діаграми для вхідної та випрямленої напруг для двопівперіодного випрямляча наведені на рис.6.2.

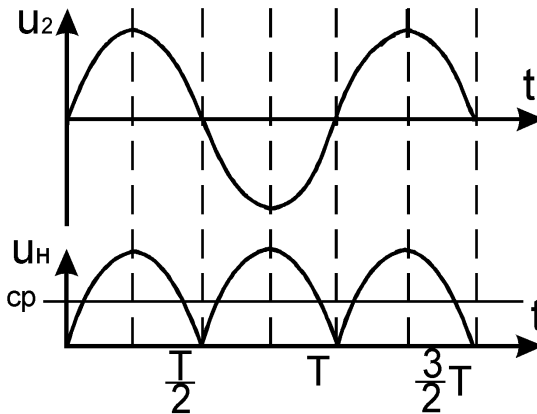


Рис.6.2. Часові діаграми для вхідної та випрямленої напруги для двопівперіодного випрямляча

Розкладання у ряд Фур'є імпульсів напруги при двопівперіодному випрямлянні приводить до виразу:

$$u = U_d (1 + 0.67 \cos 2\omega t - 0.14 \cos 4\omega t + \dots)$$

Звідси коефіцієнт пульсації $p = 0,67$.

8. Оскільки випрямлений струм через навантаження проходить двічі протягом кожного періоду (див. рис.2), то частота пульсацій буде рівна: $f_H = 2 \cdot 2\pi = 4\pi$.

Домашнє завдання. Виконати розрахунки пунктів 1-8 згідно вихідних даних табл.6.1

Остання цифра	U, B	Передостання цифра	$P_n, Вт$
0	24	0	25
1	12	1	10
2	36	2	15
3	42	3	30
4	110	4	35
5	60	5	40
6	40	6	25
7	85	7	70
8	30	8	20
9	50	9	100

Додаток 6.1. Параметри випрямних діодів

Тип діода	Середній прямий струм $I_{пр.ср.}, A$	Середня пряма напруга $U_{пр}, B$	Зворотна напруга $U_{зв}, B$
Д20	0,1	1,0	100
Д207	0,1	1,0	200
Д208	0,1	1,0	300
Д226	0,3	1,0	400
Д229	0,3	1,0	200
Д229	0,3	1,0	400
Д229	0,4	1,0	200
Д229	0,7	1,0	300
Д214	2,0	1,5	100
Д238	2,0	1,0	500
Д215	5,0	1,2	200
Д231	5,0	1,5	300
Д305	10,0	1,0	50
Д302	1,0	0,5	200
Д243	10,0	1,0	200

Список рекомендованої літератури

1. Квітка С. О. Силові електронні пристрої в системах керування : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. 180 с.

2. Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматики та автоматизації : навчальний посібник / друге видання, змінене і доповнене. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 336 с

3. Воронич А. Р. Основи автоматичного керування технічними об'єктами : конспект лекцій. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. 128 с. URL: <https://files.library.nung.edu.ua/chytalnya/6218/index.html#p=12>.

4. Пузанов А. П. Електротехніка і електромеханіка : навчальний посібник. К. : Видавничий центр «Vitas-LTD», 2019. 304 с.

5. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК : підручник / Мартиненко І. І., Лисенко В. П., Тищенко Л. П., Болбот І. М., Олійник П. В. Київ, 2008. 330 с.

6. Електропривод і автоматизація : навчальний посібник / О. Ю.Синявський, П. І Савченко, Ю. М. Лаврінченко та ін. ; за ред. О. Ю.Синявського. Київ : Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с.

7. Автоматизація виробничих процесів : навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / Я. І. Проць, В. Б. Савків, О. К. Шкодзінський, О. Л. Ляшук. [авторська версія]. 2011. 344 с.

8. Попова І. О., Курашкін С. Ф., Вовк О. Ю., Попрядухін В. С. Теоретичні основи електротехніки, частина 3 : навч. посіб. для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. 221 с.

9. Проектування систем електрифікації технологічних процесів на підприємствах АПК. Загальні питання проектування : навчальний посібник / В. Ф. Яковлев, Ю. М. Куценко, С. О. Квітка, Ю. О. Б гатирьов; за заг. ред. проф. Яковлева В. Ф. Мелітополь, 2010. 117 с.

10. Vasylets K., Kvasnikov V., Vasylets S. Refinement of the mathematical model of electrical energy measurement uncertainty in reduced load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4 (8 (118)). P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262260> (Scopus, Author ID

55553389000)

11. Vasylets K., Kvasnikov V., Vasylets S. Determining the static characteristic of a measuring current transformer at a reduced load of the metering unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5 (8 (119)). P. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265068> (Scopus, Author ID 55553389000).

12. Vasylets S., Vasylets K. Determining optimal rated power of a photovoltaic station for mine dewatering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 6 (8 (120)). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267034> (Scopus, Author ID 55553389000)

13. Vasylets K. S., Vasylets S. V. Increasing the accuracy of electricity accounting by digital information-measuring systems. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6 No. 2. P. 151–162. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.11>

14. Vasylets S., Vasylets K., Ilchuk V. Increasing the accuracy of electrical energy accounting at reduced load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 4 (8 (130)). P. 19–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310103> (Scopus, Author ID 55553389000).

15. Васи́лець С.В., Васи́лець К.С., Ільчук В.В. Оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії при зниженому струмі через вузол обліку. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2024. 339 (4). С. 49–54.

16. Розроблення та дослідження сучасних систем електроенергетики та автоматизації : монографія / В. В. Древецький, С. В. Васи́лець, А. В. Рудик та інші. Рівне : Овід, 2020. 380 с.