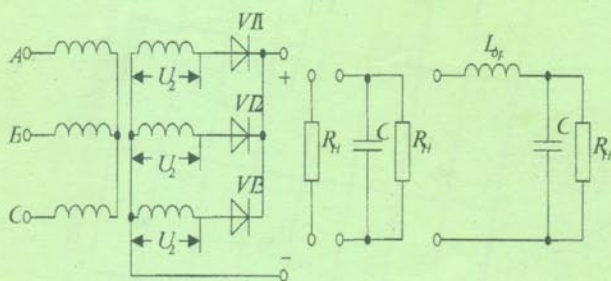


# Електроживлення

(лабораторний практикум)



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

С.Т.Барась, М.А.Філінюк, С.М.Павлов

# **Електроживлення**

**(лабораторний практикум)**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як лабораторний практикум для студентів радіоелектронного профілю. Протокол №10 від 27 травня 2004 р.

*Рецензенти:*

*Подзаренко В.О.* – доктор технічних наук, професор  
*Осадчук В.С.* – доктор технічних наук, професор  
*Рудик С.Д.* – кандидат технічних наук, начальник СКТБ ОАО  
“Маяк”

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Барась С.Т., Філінюк М.А., Павлов С.М.**

Б 24 **Електроживлення (лабораторний практикум).** – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 60 с.

У посібнику подані короткі теоретичні відомості та практичні задачі з прикладами їх розв'язання, а також методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Методичні вказівки містять детальні схеми стендів та їх опис. Посібник стане в нагоді студентам радіоелектронного профілю денної та заочної форм навчання.

УДК 621.39

# ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	4
<b>1 Трифазні електричні кола</b> .....	5
1.1 Короткі теоретичні відомості .....	5
1.2 Приклади розв'язання задач .....	11
1.3 Задачі .....	14
1.4 Лабораторна робота №1 «Дослідження трифазних кіл електроживлення» .....	18
<b>2 Випрямні пристрої та згладжувальні фільтри</b> .....	22
2.1 Короткі теоретичні відомості .....	22
2.2 Приклади розв'язання задач .....	30
2.3 Задачі .....	32
2.4 Лабораторна робота №2 «Дослідження властивостей і характеристик випрямних пристроїв та згладжувальних фільтрів» .....	36
<b>3 Стабілізатори постійної напруги</b> .....	46
3.1 Короткі теоретичні відомості .....	46
3.2 Приклади розв'язання задач .....	51
3.3 Задачі .....	52
3.4 Лабораторна робота №3 «Дослідження напівпровідникових стабілізаторів постійної напруги».....	53
Література .....	59

## ВСТУП

Надійність роботи радіоелектронної апаратури значною мірою визначається надійністю роботи системи електроживлення, яка повинна забезпечити безперебійність функціонування апаратури навіть в аварійних ситуаціях.

Вимоги щодо зменшення масогабаритних показників та збільшення коефіцієнта корисної дії апаратури неперервно зростають. Слід зауважити, що частка, яка відводиться на джерела і системи електроживлення, достатньо вагома. Розв'язати такі задачі можливо лише за умови умілого, грамотного підходу до вибору, розрахунку та проектування систем та джерел електроживлення.

Основним джерелом електричної енергії для підприємств зв'язку та медичних установ є енергосистеми або місцеві електричні станції, які виробляють змінний струм з частотою 50 Гц. Однак для безпосереднього живлення радіоелектронної апаратури потрібний, зазвичай, постійний струм.

Перетворення змінного струму в постійний здійснюється за допомогою випрямних пристроїв – випрямлячів. Найширше у випрямлячах застосовуються напівпровідникові вентиля – діоди. Якість випрямленої напруги, що створюється на виході випрямляча, не завжди задовольняє вимоги споживача через наявність пульсацій та безпосередню залежність її величини від амплітуди і частоти напруги мережі (вхідної напруги випрямляча). Для зменшення пульсацій випрямленої напруги між споживачем і випрямлячем розміщують згладжувальний фільтр. Для стабілізації вихідної напруги пристроїв електроживлення застосовують різні види стабілізаторів постійної напруги.

В даній роботі зосереджений матеріал, який стосується трьох ключових моментів в побудові системи електроживлення:

- трифазні електричні кола;
- випрямні пристрої та згладжувальні фільтри;
- напівпровідникові стабілізатори постійної напруги.

Відповідно до цього робота складається з трьох основних розділів, у кожному з яких наводяться короткі теоретичні відомості, практичні задачі і приклади їх розв'язання та четвертого розділу, цілком присвяченого опису та методиці проведення лабораторних робіт.

# 1 ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

## 1.1 Короткі теоретичні відомості

Під трифазною симетричною системою *ерс* (електрорушійних сил) розуміють сукупність трьох синусоїдних *ерс* однакових частоти та фази, які зміщені між собою по фазі на  $120^\circ$ . Для того, щоб відрізнити три *ерс* у системі, одну з них позначають  $e_A$  (фаза А), ту, яка відстає від неї на  $120^\circ$  –  $e_B$  (фаза В) і ту, яка випереджає її –  $e_C$  (фаза С). Відповідно до цього миттєві значення фазних *ерс* виражаються такими формулами (якщо за  $t = 0$  прийняти момент часу, коли напруга фази А проходить через нуль і стає додатною):

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (1.1)$$

В комплексному виді (при суміщенні дійсної осі з напругою фази А) фазні напруги записуються:

$$\dot{E}_A = E_m; \quad \dot{E}_B = E_m e^{-j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = E_m e^{j120^\circ}. \quad (1.2)$$

На рисунку 1.1 наведений графік миттєвих значень *ерс* всіх трьох фаз.

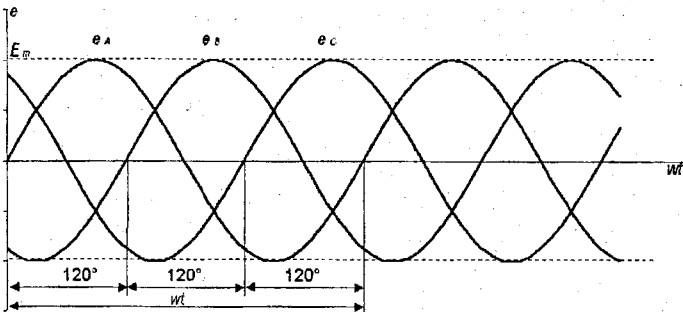


Рисунок 1.1 - Графік миттєвих значень  $e_A, e_B, e_C$

Напруги на обмотках трифазного джерела зручно показати у вигляді векторної діаграми, рисунок 1.2.

Трифазне коло складається з трифазної системи *ерс* (генератор), трифазного навантаження та з'єднувальних проводів. На схемах трифазний генератор наводять у вигляді трьох обмоток, які найчастіше з'єднують зіркою. Прийнято вважати *початком* кожної фази ту її точку, в якій позитивно спрямований струм надходить з обмотки генератора у зовнішнє коло, і *кінцем* фази – ту точку, в якій позитивно спрямований струм

надходити із зовнішнього кола в обмотку генератора. *Початки* фаз позначають буквами  $A, B, C$ , а *кінець* – буквою  $O$ .

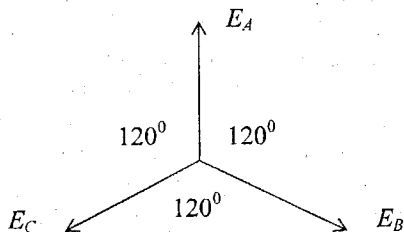


Рисунок 1.2 - Векторна діаграма напруг трифазного джерела

Якщо навантаження фаз мають однакову величину і характер, то струми в них  $I_A, I_B, I_C$  будуть однаковими за величиною і зміщені на однакові кути  $\varphi$  відносно відповідних *ерс*. Між собою ці струми будуть мати також зсуви  $120^\circ$  (як і *ерс*), отже, як легко побачити з векторної діаграми, рисунок 1.2, струми у фазах будуть об'єднані таким співвідношенням:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (1.3)$$

Таке навантаження називається симетричним.

Обмотки фаз генератора, три однофазних генератори або три навантаження можна з'єднати за схемою *зірки* або *трикутника*.

На рисунку 1.3 наведена схема з'єднання навантаження зіркою. Спільна точка, в якій об'єднані кінці фаз генератора (або приймача - навантаження), називається його нульовою точкою або нейтраллю, а провід, що з'єднує нульові точки  $O$  і  $O_I$  – нульовим або нейтральним проводом. Струм у нейтральному проводі, як видно із схеми, є сумою фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (1.4)$$

Напруги між початками фаз генератора або приймача і його нейтраллю, які позначаються  $U_A, U_B, U_C$ , називаються *фазними напругами*. Напруги між початками фаз відповідно  $A$  і  $B, B$  і  $C, C$  і  $A$ , які позначаються  $U_{AB}, U_{BC}$  і  $U_{CA}$ , називаються *лінійними напругами*. Враховуючи, що точка  $O$  є точкою нульового потенціалу, а точкам  $A, B$  і  $C$  відповідають фазні напруги  $U_A, U_B$  і  $U_C$  (потенціали цих точок дорівнюють фазним напругам), то лінійні напруги можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Наведену операцію віднімання зручно продемонструвати на векторній діаграмі шляхом додавання векторів  $\dot{U}_A$  і  $(-\dot{U}_B)$ ,  $\dot{U}_B$  і  $(-\dot{U}_C)$ ,

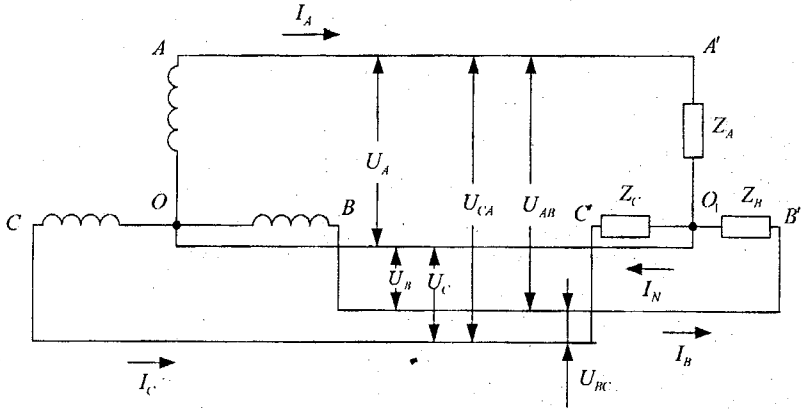


Рисунок 1.3 - Схема з'єднання навантаження зіркою

$\dot{U}_C$  і  $(-\dot{U}_A)$ . Це показано на рисунку 1.4. З діаграми видно, що величина і напрямки векторів лінійних напруг можуть бути отримані простішим шляхом, якщо з'єднати прямою лінією кінці векторів відповідних фазних напруг, причому вектор лінійної напруги спрямований від кінця того, що віднімається, до кінця того, від якого віднімають. Три вектори лінійних напруг однакові за величиною і повернуті між собою, як і фазні напруги, на кут  $120^\circ$ . При цьому зірка лінійних напруг зміщена відносно зірки фазних напруг на кут  $30^\circ$  вперед. Якщо розглянути будь-який

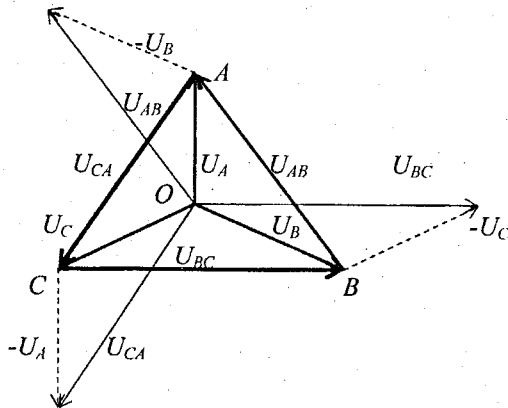


Рисунок 1.4 - Векторна діаграма фазних та лінійних напруг

рівнобедрений трикутник (наприклад  $\Delta OAB$ ) з кутом при вершині  $120^0$ , то можна отримати важливе співвідношення між лінійною і фазною напругами для трифазного кола при з'єднанні навантаження зіркою:

$$\begin{aligned} \frac{U_{AB}}{2} &= U_A \cos 30^0 = U_A \frac{\sqrt{3}}{2}, \\ U_{AB} &= U_A \cdot \sqrt{3}, \\ U_{\Pi} &= \sqrt{3} \cdot U_{\phi}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Зі схеми, рисунок 1.3, видно, що для з'єднання навантаження зіркою лінійний струм дорівнює фазному:

$$I_{\Pi} = I_{\phi}. \quad (1.7)$$

Розглянемо тепер з'єднання навантаження трикутником. Схема такого з'єднання наведена на рисунку 1.5.

При такому з'єднанні не розрізняють фазні і лінійні напруги, оскільки напруга між початком і кінцем кожної фази приймача (навантаження) виявляється в той же час і лінійною напругою. Але з'являється різниця між фазними струмами навантаження  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  і  $I_{CA}$  та лінійними струмами  $I_A$ ,  $I_B$  і  $I_C$ . Згідно з законом Кірхгофа для наведеної схеми можна записати:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Із співвідношень (1.8) витікає, що сума лінійних струмів дорівнює нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} + \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} + \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 0. \quad (1.9)$$

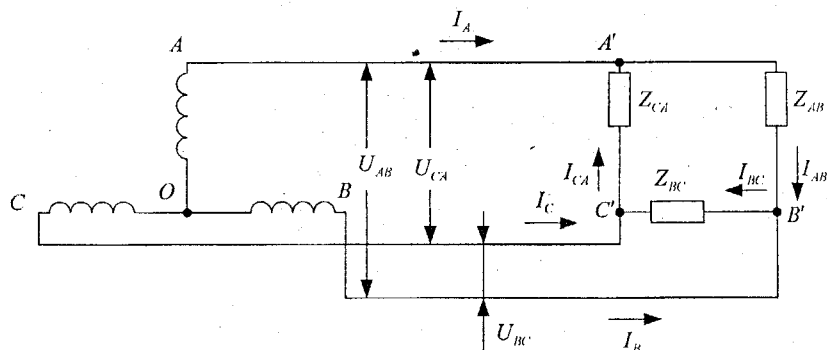


Рисунок 1.5 - Схема з'єднання навантаження трикутником

Векторна діаграма зображена на рисунку 1.6. На цій діаграмі показано векторне віднімання фазних струмів відповідно до співвідношень (1.8) (аналогічно з'єднанню навантаження зіркою). Векторна діаграма відповідає випадку симетричного навантаження, коли фазні струми  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  і  $I_{CA}$  рівні за величиною і зміщені на однакові кути відносно відповідних фазних (лінійних) напруг  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  і  $U_{CA}$ . Лінійні струми  $I_A$ ,  $I_B$  і  $I_C$  також виявляються рівними між собою і симетрично розташованими, причому зірка лінійних струмів зміщена відносно зірки фазних струмів на  $30^\circ$  назад.

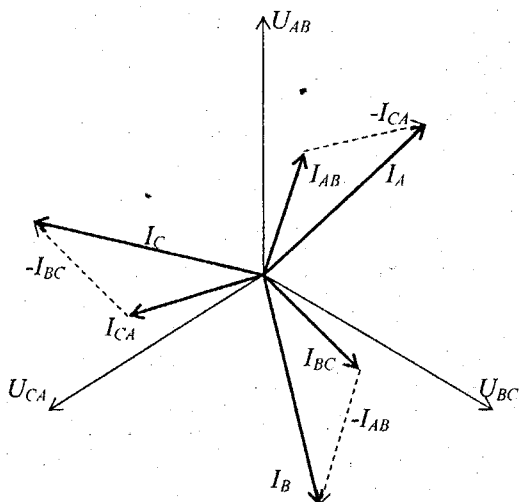


Рисунок 1.6 - Векторна діаграма фазних та лінійних струмів

Вектор кожного з лінійних струмів, рисунок 1.6, є основою рівнобедреного трикутника з кутом  $120^\circ$  при вершині, тому між значеннями лінійного і фазного струмів при симетричному навантаженні та з'єднанні його трикутником має місце таке ж співвідношення, як і між лінійною та фазною напругами при з'єднанні навантаження зіркою, отже:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \quad (1.10)$$

Як вже зазначалось, для з'єднання навантаження трикутником справедливо також таке співвідношення:

$$U_L = U_\phi. \quad (1.11)$$

**Потужність** трифазної системи дорівнює сумі потужностей окремих фаз:

активна

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C; \quad (1.12)$$

реактивна

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C; \quad (1.13)$$

повна

$$S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C. \quad (1.14)$$

Для симетричного навантаження маємо:

$$\begin{aligned} U_A &= U_B = U_C = U_\phi; \\ I_A &= I_B = I_C = I_\phi; \\ \cos \varphi_A &= \cos \varphi_B = \cos \varphi_C = \cos \varphi; \\ \sin \varphi_A &= \sin \varphi_B = \sin \varphi_C = \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Якщо брати до уваги співвідношення між лінійними і фазними напругами і струмами (1.6, 1.7, 1.10, 1.11), а також співвідношення (1.15), то для симетричної трифазної системи *незалежно* від схеми з'єднання (зірка чи трикутник) потужності можна визначити так:

активна

$$P = 3 \cdot U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi; \quad (1.16)$$

реактивна

$$Q = 3 \cdot U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi; \quad (1.17)$$

повна

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 \cdot U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}. \quad (1.18)$$

**Коефіцієнт потужності** для трифазної системи визначається як відношення активної потужності до повної:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}. \quad (1.19)$$

Коефіцієнт потужності може бути визначений також за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{X_L^2 + X_C^2}}, \quad (1.20)$$

де  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$  – відповідно активний, індуктивний та ємнісний опори у фазі;  
 $Z$  – повний опір фази.

Очевидно, активна і реактивна потужності в будь-якій фазі можуть бути визначені з використанням відомого співвідношення (якщо відомі відповідні величини фазного струму та активного чи реактивного опорів):

$$P = I_\phi^2 \cdot R_\phi; \quad Q_L = I_\phi^2 \cdot X_{\phi L}; \quad Q_C = -I_\phi^2 \cdot X_{\phi C}. \quad (1.21)$$

## 1.2 Приклади розв'язання задач

**Приклад 1.** Визначити струми у фазах, лінійні струми та струм у нейтралі і активну потужність, якщо до трифазної лінії з лінійною напругою 220 В приєднано несиметричний приймач, з'єднаний за схемою зірки з нейтральним дротом. Активні й реактивні опори фаз такі:  $R_A = 11 \text{ Ом}$ ,  $X_A = 0 \text{ Ом}$ ;  $R_B = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_B = 6 \text{ Ом}$ ;  $R_C = 18 \text{ Ом}$ ,  $X_C = -24 \text{ Ом}$ . Опором нейтрального дроту знехтувати.

### Розв'язання

Користуючись формулою (1.6), визначимо фазну напругу:

$$U_\phi = \frac{U_\Pi}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.}$$

Для визначення фазних струмів знайдемо величини повних опорів у фазах:

$$Z_A = R_A = 11e^{j0};$$

$$Z_B = R_B + jX_B = 8 + j6 = \sqrt{64 + 36} e^{j \arctg \frac{X_B}{R_B}} = 10e^{j37^\circ};$$

$$Z_C = 18 - j24 = 30e^{-j53^\circ}.$$

Фазні струми:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{127e^{j0}}{11e^{j0}} = 11,5 \text{ А};$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{127e^{j120^\circ}}{10e^{j37^\circ}} = 12,7e^{j83^\circ} = (1,5 + j12,6) \text{ А};$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{127e^{j240^\circ}}{30e^{-j53^\circ}} = 4,2e^{j293^\circ} = (1,6 - j3,8) \text{ А}.$$

Модулі струмів у фазах:

$$|I_A| = 11,5 \text{ А}; \quad |I_B| = 12,7 \text{ А}; \quad |I_C| = 4,2 \text{ А}.$$

При з'єднанні навантаження зіркою лінійні струми дорівнюють фазним (1.7). Струм у нейтральному дроті (1.4):

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 11,5 + 1,5 + j12,6 + 1,6 - j3,8 = (14,6 + j8,8) \text{ А}.$$

Модуль струму у нейтралі:

$$|I_N| = \sqrt{14,6^2 + 8,8^2} = 17 \text{ А}.$$

Коефіцієнти потужностей фаз визначимо за формулою (1.20):

$$\cos \varphi_A = 1; \quad \cos \varphi_B = \frac{8}{10} = 0,8; \quad \cos \varphi_C = \frac{18}{30} = 0,6.$$

Активна потужність системи (несиметричної) може бути визначена за формулою (1.12):

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = \\ = 127 \cdot 11,5 \cdot 1 + 127 \cdot 12,7 \cdot 0,8 + 127 \cdot 4,2 \cdot 0,6 = 3070,86 \text{ Вт.}$$

**Приклад 2.** До трифазної лінії, лінійні напруги якої симетричні:  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220 \text{ В}$ , приєднані три приймачі за схемою трикутника, рисунок 1.7. Комплексні опори цих приймачів:

$$Z_{AB} = 22 \text{ Ом}, \quad Z_{BC} = (19 - j11) \text{ Ом}, \quad Z_{CA} = (19 + j11) \text{ Ом.}$$

Визначити лінійні та фазні струми. Побудувати векторну діаграму.

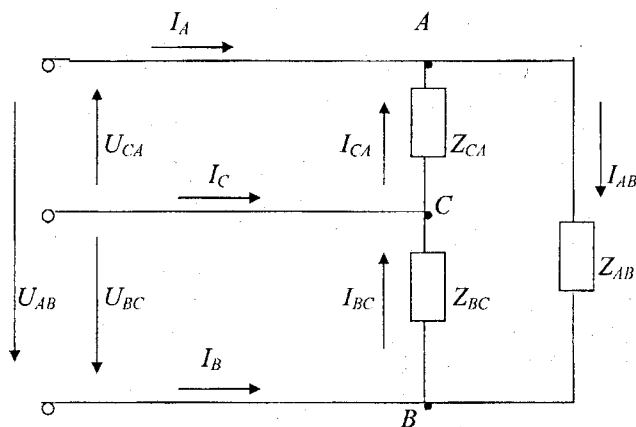


Рисунок 1.7 – Схема з'єднання приймачів трикутником

### Розв'язання

Запишемо значення лінійних напруг у комплексній формі. Вектор  $U_{AB}$  сумістимо з позитивним напрямком дійсної осі, тобто:

$$\dot{U}_{AB} = 220 \cdot e^{j0} = 220 \text{ В.}$$

Тоді інші лінійні напруги запишуться:

$$\dot{U}_{BC} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} = 220 [\cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ)] = (-110 - j190) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{CA} = 220 \cdot e^{j120^\circ} = 220 (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = (-110 + j190) \text{ В.}$$

На підставі закону Ома визначимо струми окремих приймачів енергії:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{220}{22} = 10 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{-110 - j190}{19 - j11} = \frac{(-110 - j190) \cdot (19 + j11)}{19^2 + 11^2} = -j10 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{-110 + j190}{19 + j11} = \frac{(-110 + j190) \cdot (19 - j11)}{19^2 + 11^2} = j10 \text{ A}.$$

Скориставшись формулами (1.8), знайдемо комплекси і модулі лінійних струмів:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = (10 - j10) \text{ A}; \quad |\dot{I}_A| = 14,1 \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = (-10 - j10) \text{ A}; \quad |\dot{I}_B| = 14,1 \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = j10 - (-j10) = j20 \text{ A}; \quad |\dot{I}_C| = 20 \text{ A}.$$

Векторна діаграма зображена на рисунку 1.8.

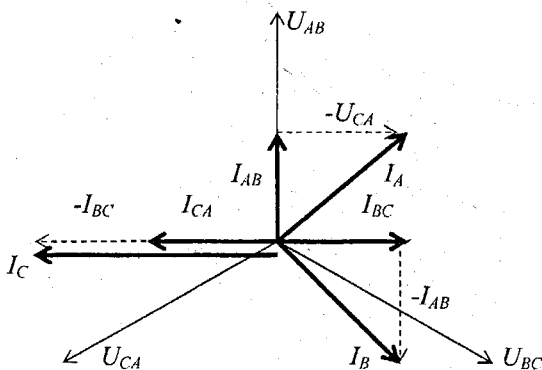


Рисунок 1.8 – Векторна діаграма лінійних і фазних струмів

Оскільки всі фазові зсуви визначені відносно лінійної напруги  $U_{AB}$ , то  $(-j)$  означає запізнення струму  $I_{BC}$  від напруги  $U_{AB}$  на  $90^\circ$ , а  $(j)$  - випередження струму  $I_{CA}$  відносно цієї ж напруги також на  $90^\circ$ . Відносно напруг  $U_{BC}$  і  $U_{CA}$  струми в цих фазах мають фазові зсуви, які відповідають характеристам їх опорів – струм  $I_{BC}$  випереджає напругу  $U_{BC}$  (ємнісне навантаження), а струм  $I_{CA}$  відстає від напруги  $U_{CA}$  (індуктивне навантаження). Струм  $I_{AB}$  збігається з напругою  $U_{AB}$  (активне навантаження).

Очевидно, зсуви фаз між струмами і напругами можуть бути визначені безпосередньо з комплексних опорів:

$$\varphi_{AB} = \arctg \frac{0}{22} = 0^\circ; \quad \varphi_{BC} = \arctg \frac{-11}{19} = -30^\circ; \quad \varphi_{CA} = \arctg \frac{11}{19} = 30^\circ.$$

### 1.3 Задачі

1.3.1. Знайти фазні та лінійні струми в колі при з'єднанні приймачів трикутником і побудувати векторну діаграму, якщо лінійна напруга дорівнює 120 В, а між провідниками А і В в якості навантаження ввімкнена лампа потужністю 60 Вт (потім додатково ввімкнути ще одну лампу такої ж потужності між провідниками В і С).

Відповідь:  $I_A = 0,5 A$ ;  $I_B = -I_A$  – при ввімкненій лампі між А і В.

1.3.2. В схемі з'єднання приймачів зіркою напруга між кожним лінійним провідником і нейтраллю дорівнює 120 В. Лампи потужністю 60 Вт ввімкнені між провідником А і нульовою точкою та провідником В і нульовою точкою. Визначити струми в провідниках та побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $I_A = I_B = 0,5 A$ ;  $I_N = I_A + I_B$ ;  $I_C = 0$ .

1.3.3. Обмотки трифазного трансформатора з'єднані зіркою і фазна напруга на обмотці дорівнює 127 В. На кінці трифазної трипроводової лінії, приєднаної до цього генератора, ввімкнені за схемою трикутника електролампи. В кожній фазі цього приймача паралельно з'єднані 20 ламп потужністю 55 Вт кожна. Визначити струми в лінійних провідниках. Навести схему, ввести на ній позначення напруг і струмів.

Відповідь:  $I_L = 8,65 A$ .

1.3.4. Струм у провіднику С дорівнює 22 А, а в нульовому – 2 А. Визначити струми в провідниках А і В (лінійні струми), якщо відомо, що струми  $I_A$  та  $I_B$  рівні між собою.

Відповідь:  $I_A = I_B = 20 A$  (або  $I_A = I_B = 24 A$ ).

1.3.5. Три котушки перез'єднують зі схеми трикутника на схему зірки за умови рівності лінійних напруг у мережі. Як зміняться при цьому струми в лінійних провідниках, якщо у схемі трикутника у кожній котушці  $X_\Delta = 2,4 \cdot R$ , а у схемі зірки (через зменшення насичення осердя)  $X_Y = 3 \cdot R$ .

Відповідь:  $\frac{I_\Delta}{I_Y} = 3,75$ .

1.3.6. Приймачі трифазної системи з'єднані зіркою. Фазна напруга дорівнює 220 В. Навантаження фаз мають опори однакової величини, але різного характеру:  $Z_A = 10 \text{ Ом}$ ,  $Z_B = j10 \text{ Ом}$ ,  $Z_C = -j10 \text{ Ом}$ . Визначити струм у нейтралі, побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $I_N = 16 A$ .

1.3.7. Приймачі трифазної системи з'єднані трикутником, рисунок 1.9. Лінійна напруга дорівнює 380 В. Навантаження фаз мають опори

однакової величини, але різного характеру:  $Z_{AB} = -j10 \text{ Ом}$ ,  $Z_{BC} = j10 \text{ Ом}$ ,  $Z_{CA} = 10 \text{ Ом}$ . Визначити лінійні струми  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $I_A = 19,7 \text{ А}$ ;  $I_B = 38 \text{ А}$ ;  $I_C = 19,7 \text{ А}$ .

1.3.8. Три резистори, кожний опором  $125 \text{ Ом}$ , з'єднані зіркою і ввімкнені у трифазну чотирипроводову мережу. Струм кожної фази становить  $880 \text{ мА}$ . Визначити діючі значення фазної та лінійної напруг, лінійного струму та повну потужність, що споживається навантаженням, побудувати векторну діаграму струмів та напруг.

Відповідь:  $U_\phi = 110 \text{ В}$ ;  $U_L = 190,5 \text{ В}$ ;  $I_L = 0,88 \text{ А}$ ;  $S = 390,4 \text{ ВА}$ .

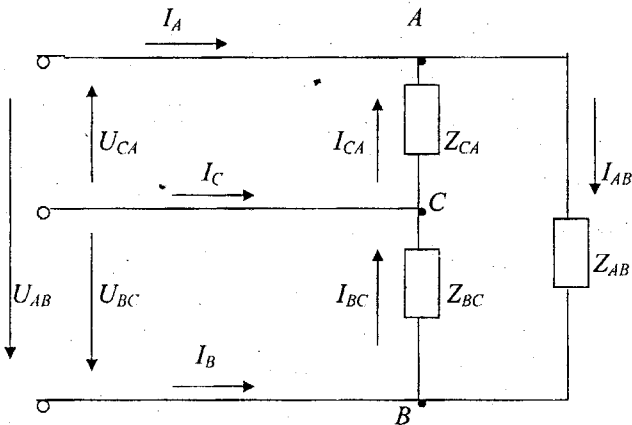


Рисунок 1.9 – Схема з'єднання приймачів трикутником

1.3.9. Три індуктивні котушки з активним опором  $34,2 \text{ Ом}$  і індуктивним опором  $23,5 \text{ Ом}$  з'єднані зіркою та підключені до джерела трифазної напруги. Активна потужність у фазі становить  $1,6 \text{ кВт}$ . Визначити діючі значення лінійної та фазної напруг, струму у фазі, повну та реактивну потужності навантаження.

Відповідь:  $U_\phi = 282,85 \text{ В}$ ;  $U_L = 490 \text{ В}$ ;  $I_\phi = 6,84 \text{ А}$ ;  $S = 5804 \text{ ВА}$ ;  
 $Q = 3250 \text{ Вар}$ .

1.3.10. До джерела трифазної напруги з діючим значенням лінійної напруги  $380 \text{ В}$  і частотою  $50 \text{ Гц}$  під'єднане рівномірне індуктивне навантаження за схемою зірки. Діюче значення струму у фазі  $1,25 \text{ А}$ , коефіцієнт потужності навантаження  $\cos \varphi = 0,456$ . Визначити повний і активний опори навантаження, його індуктивність, повну потужність споживання. Побудувати векторну діаграму струмів та напруг.

Відповідь:  $Z = 176 \text{ Ом}$ ;  $R = 80,25 \text{ Ом}$ ;  $L = 0,5 \text{ Гн}$ ;  $S = 825 \text{ ВА}$ .

1.3.11. До трифазного генератора з  $\epsilon$  у фазі 309 В, обмотки якого з'єднані за схемою зірки та мають активний і індуктивний опори у фазі відповідно 0,5 Ом і 1,5 Ом, приєднане рівномірне навантаження. Навантаження з'єднане за схемою зірки з активним та реактивним опором у фазі відповідно 10 Ом і 12 Ом. Визначити діючі значення лінійних напруг генератора та навантаження, струм у лінії та втрати напруги у лінії, якщо  $R_{\text{л}} = X_{\text{л}} = 2,5 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $I_{\text{л}} = 15 \text{ А}$ ;  $U_{\text{лГ}} = 494 \text{ В}$ ;  $U_{\text{лН}} = 402 \text{ В}$ ;  $\Delta U_{\text{л}} = 53 \text{ В}$ .

1.3.12. Три однакові групи ламп розжарення, які з'єднані за схемою зірки, ввімкнені у трифазну чотирипроводову мережу з діючим значенням лінійної напруги 380 В. Визначити повну потужність, яка споживається навантаженням, якщо лінійний струм дорівнює 16,5 А.

Відповідь:  $S = 10860 \text{ ВА}$ .

1.3.13. Приймач енергії, що складений за схемою зірки, під'єднаний до трифазної чотирипроводнової мережі з діючим значенням лінійної напруги 220 В і містить в кожній фазі опір 100 Ом. Визначити значення струму у лінії та в нульовому проводі.

Відповідь:  $I_{\text{л}} = 1,27 \text{ А}$ ;  $I_{\text{N}} = 0$ .

1.3.14. У фазах А, В і С приймача енергії, приєданого до трифазної чотирипроводнової мережі, діючі значення струмів відповідно дорівнюють 10, 30 і 5 А. Визначити струм у нейтральному проводі, якщо навантаження активне.

Відповідь:  $I_{\text{N}} = 22,9 \text{ А}$ .

1.3.15. У чотирипроводову трифазну мережу ввімкнене нерівномірне активне навантаження, яке має значення опорів у фазах А, В і С відповідно 20, 40 і 10 Ом. Визначити струми у фазах, потужність споживання навантаження та струм у нейтральному проводі, якщо діюче значення лінійної напруги становить 380 В.

Відповідь:  $I_{\text{A}} = 11 \text{ А}$ ;  $I_{\text{B}} = 5,5 \text{ А}$ ;  $I_{\text{C}} = 22 \text{ А}$ ;  $I_{\text{N}} = 14,55 \text{ А}$ ;  $P = 8470 \text{ Вт}$ .

1.3.16. До джерела трифазної мережі з лінійною напругою 380 В і частотою 50 Гц приєднане рівномірне навантаження за схемою зірки з повним опором у фазі 90 Ом та індуктивністю 180 мГн. Визначити активну, реактивну та повну потужності, коефіцієнт потужності, діючі значення лінійного струму та фазної напруги. Побудувати векторну діаграму струмів та напруг.

Відповідь:  $P = 1260 \text{ Вт}$ ;  $Q = 1010 \text{ Вар}$ ;  $S = 1620 \text{ ВА}$ ;  
 $\cos \varphi = 0,778$ ;  $I_{\text{л}} = 2,45 \text{ А}$ ;  $U_{\varphi} = 220 \text{ В}$ .

1.3.17. У трифазну мережу з діючим значенням лінійної напруги 220 В і частотою 50 Гц ввімкнений споживач за схемою трикутника (рівномірне навантаження), у кожній фазі якого використана індуктивність 0,3 Гн з послідовно з'єднаним з нею резистором, опір якого становить 20 Ом. Визначити діючі значення лінійних і фазних струмів, фазну напругу, повну, реактивну та активну потужності.

Відповідь:  $P = 317 \text{ Вт}$ ;  $Q = 1470 \text{ Вар}$ ;  $S = 1520 \text{ ВА}$ ;  $I_{\varphi} = 2,3 \text{ А}$ ;  $I_{\text{л}} = 3,98 \text{ А}$ ;  $U_{\varphi} = 220 \text{ В}$ .

1.3.18. Визначити потужність трифазної системи при з'єднанні навантаження зіркою, якщо фазна напруга становить 220 В, а активні опори фаз приймача однакові і дорівнюють  $R_A = R_B = R_C = 22 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $P = 6600 \text{ Вт}$ .

1.3.19. Виконати розрахунки струмів у фазах, побудувати векторну діаграму та визначити струм у нульовому проводі трифазної системи з активним навантаженням, з'єднаним зіркою. Фазна напруга становить 220 В, опори фаз:  $R_A = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_B = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_C = 10 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $I_N = 22 \text{ А}$ .

1.3.20. Знайти коефіцієнт потужності та реактивну потужність трифазного генератора гідроелектростанції, номінальна потужність якого складає 640000 кВА, а активна – 600000 кВт.

Відповідь:  $\cos \varphi = 0,94$ ;  $Q = 218352 \text{ кВар}$ .

1.3.21. До чотирипроводової трифазної мережі з діючим значенням лінійної напруги 220 В приєднане нерівномірне навантаження. Потужності споживання в фазах становлять:  $P_A = 3 \text{ кВт}$ ,  $P_B = 1,8 \text{ кВт}$ ,  $P_C = 0,6 \text{ кВт}$ . Визначити діюче значення струму у нейтральному проводі.

Відповідь:  $I_N = 16 \text{ А}$ .

1.3.22. До трифазної чотирипроводової мережі з діючим значенням лінійної напруги 380 В і частотою 50 Гц приєднаний приймач енергії, з'єднаний за схемою зірки. У фазу А включена котушка з індуктивністю 0,18 Гн і активним опором 80 Ом, у фазу В – резистор опором 69 Ом, у фазу С – конденсатор ємністю 30 мкФ з послідовно з'єднаним резистором, опір якого становить 40 Ом. Визначити діючі значення лінійних і фазних струмів та повну потужність, що споживається навантаженням.

Відповідь:  $I_A = 2,25 \text{ А}$ ;  $I_B = 3,2 \text{ А}$ ;  $I_C = 2 \text{ А}$ ;  $S = 1280 \text{ ВА}$ .

1.3.23. До трифазного генератора, обмотки якого з'єднані за схемою зірки, приєднане рівномірне навантаження, яке з'єднане за такою ж схемою. Лінійний провід має активний опір 2 Ом і індуктивність 16 мГн. Повний опір навантаження в кожній фазі становить 80 Ом (конденсатор ємністю 53 мкФ з послідовно ввімкненим резистором). Визначити діюче значення напруги в навантаженні, якщо лінійна напруга генератора дорівнює 380 В при частоті мережі 50 Гц. Побудувати векторну діаграму струмів та напруг.

Відповідь:  $U_{II} = 236 \text{ В}$ .

## Лабораторна робота №1 “Дослідження трифазних кіл електроживлення”

**Мета роботи** – виконати дослідження симетричних та несиметричних трифазних кіл при з’єднанні навантаження зіркою та трикутником.

### Опис лабораторного стенда

Для безпечного виконання лабораторних робіт трифазна електрична система (лабораторний трифазний генератор) створена шляхом трансформації трифазної мережної напруги до величини фазної напруги близько десяти вольт. З цією метою використані три знижувальних трансформатори, на первинні обмотки яких подаються фазні напруги трифазної мережі. Вторинні обмотки трансформаторів гальванічно розв’язані між собою і з’єднані з лабораторним стендом через запобіжники. На рисунку 1.10 наведена принципова схема лабораторного трифазного генератора, з якої видно, що кожна фаза створеної трифазної системи закінчується двома незалежними клемми: фаза А – (1–1’), фаза В – (2–2’), фаза С – (3–3’). Крім цього, одна з вторинних обмоток має вивід середньої точки (точка О), що дозволить при виконанні наступної лабораторної роботи дослідити двоівперіодний однофазний випрямляч з виводом середньої точки трансформатора.

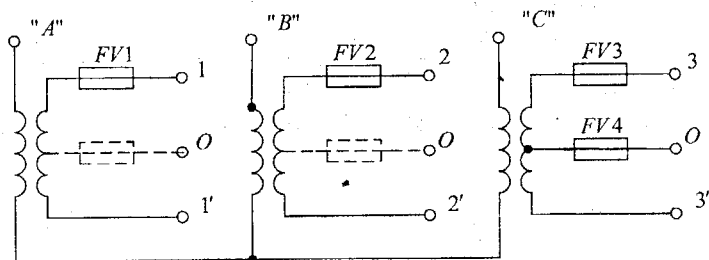


Рисунок 1.10 – Схема лабораторного трифазного генератора

Для виконання даної роботи використовується “Блок опорів”, в якому встановлені резистори навантаження ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  і  $R_5$ ) та вимірювальний резистор  $R_B$ . Опори резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  однакові і складають величину 100 Ом, резистор  $R_5$  є змінним з фіксованими значеннями опорів від 0 до 48 Ом (дискрет 2 Ом) і вимірювальний резистор  $R_B$  має опір 5 Ом.

## Порядок виконання роботи

1.1. З використанням резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  “Блоку опорів” скласти схему симетричного навантаження трифазної симетричної системи за схемою зірки. Виконати з’єднання обмоток лабораторного трифазного генератора зіркою, для чого об’єднати в одну точку кінці фаз -  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$ . Приєднати навантаження до трифазного генератора згідно зі схемою, наведеною на рисунку 1.11. В коло нейтралі послідовно ввімкнути вимірювальний резистор  $R_B$ .

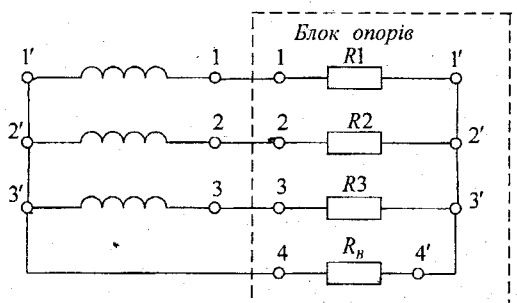


Рисунок 1.11 – Схема з’єднання навантаження зіркою

1.2. Виміряти фазні та лінійні напруги, отримані результати занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Фазні та лінійні напруги

$U_{A, B}$	$U_{B, B}$	$U_{C, B}$	$U_{AB, B}$	$U_{BC, B}$	$U_{CA, B}$

1.3. Від’єднати симетричне навантаження від трифазного генератора. Замість встановленого резистора  $R_1$  у фазу А ввімкнути послідовно з’єднані резистори  $R_4$  і  $R_5$ , створивши нову зірку навантаження. Приєднати отримане навантаження до трифазного лабораторного генератора, керуючись схемою, зображеною на рисунку 1.11. Встановлюючи опір резистора  $R_5$  0, 10, 20, 30, 40 і 48 Ом, виміряти в кожному положенні фазну напругу на цьому навантаженні (на послідовно з’єднаних  $R_4$  і  $R_5$ ) та напругу на вимірювальному резисторі  $R_B$ . Результати вимірювань занести до таблиці 1.2.

1.4. З використанням резисторів  $R_1$ ,  $R_2$  і  $(R_4 + R_5)$  скласти навантаження трифазного лабораторного генератора за схемою трикутника. Послідовно з’єднані резистори  $(R_4 + R_5)$  ввімкнути між фазами А і В. Схема досліду наведена на рисунку 1.12.

Таблиця 1.2 – Напряга на вимірювальному резисторі

$R_4+R_5,$ $Ом$	100	110	120	130	140	148
$U_{A, B}$						
$U_{R_B}, мВ$						

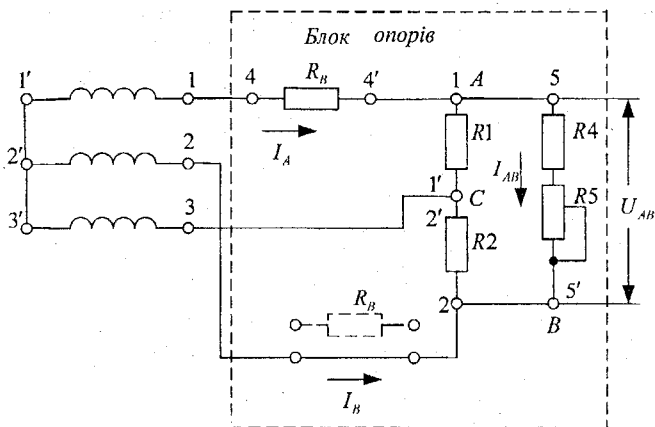


Рисунок 1.12 – Схема з'єднання навантаження трикутником

Вмикаючи послідовно вимірювальний резистор  $R_B$  в лінійні кола фаз A і B, виміряти для дискретних значень змінного опору резистора  $R_5$  0, 10, 20, 30, 40 і 48  $Ом$  лінійні напруги  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  і  $U_{CA}$  та напруги на вимірювальному резисторі:  $U_{R_B}^A$  - коли резистор  $R_B$  ввімкнений у лінійний провід фази A;  $U_{R_B}^B$  - коли резистор  $R_B$  ввімкнений у лінійний провід фази B. Результати вимірювань занести до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Дані для визначення лінійних та фазних струмів

$R_4+R_5,$ $Ом$	100	110	120	130	140	148
$U_{AB}, B$						
$U_{BC}, B$						
$U_{CA}, B$						
$U_{R_B}^A, мВ$						
$U_{R_B}^B, мВ$						

## Обробка результатів

2.1. Використовуючи дані вимірювань, занесені до таблиці 1.1, побудувати у прийнятому масштабі векторну діаграму фазних та лінійних напруг та перевірити виконання співвідношень (1.5) та (1.6).

2.2. За даними таблиці 1.2 розрахувати і побудувати в одній системі координат графічні залежності лінійного (фазного) струму  $I_A$  та струму в нейтральному проводі  $I_N$  від опору навантаження фази А – ( $R_4+R_5$ ). Пояснити отримані залежності.

2.3. Для одного із значень опору навантаження фази А (наприклад, для ( $R_4+R_5$ ) = 40 Ом) побудувати векторну діаграму струмів. Лінійні струми в фазах В і С ( $I_B$  і  $I_C$ ) розрахувати з використанням фазних напруг, отриманих в результаті досліду по пункту 1.2 (дані вимірювань занесені до таблиці 1.1). Визначити за допомогою отриманої векторної діаграми величину струму в нейтралі при несиметричному навантаженні, зіставити його з результатом експерименту, зробити висновки.

2.4. За даними таблиці 1.3 розрахувати і побудувати в одній системі координат графічні залежності лінійних струмів  $I_A$  та  $I_B$ , а також фазного струму  $I_{AB}$  від опору навантаження фази - ( $R_4+R_5$ ). Перевірити виконання співвідношення (1.10).

2.5. Побудувати векторні діаграми фазних струмів на основі даних таблиці 1.3 для ( $R_4+R_5$ ) = 100 Ом та для ( $R_4+R_5$ ) = 140 Ом. Користуючись формулами, які пов'язують лінійні та фазні струми для схеми трикутника (1.8), визначити лінійні струми шляхом векторного віднімання на отриманих діаграмах фазних струмів. Зіставити отримані за допомогою векторних діаграм значення лінійних струмів з результатами їх експериментальних вимірювань. Зробити висновки.

## Контрольні запитання

1. Охарактеризувати співвідношення між лінійними і фазними напругами та струмами при з'єднанні навантаження зіркою.
2. Що таке симетрична і несиметрична системи трифазного струму?
3. У якому випадку за умови з'єднання навантаження зіркою можна використовувати трипроводову (без нульового проводу) систему і чому?
4. Користуючись векторними діаграмами для схеми зірки, визначити фазовий зсув між фазними та лінійними напругами.
5. Охарактеризувати співвідношення між лінійними і фазними напругами та струмами при з'єднанні навантаження трикутником.
6. Навести фактори, які спричиняють нерівність нулю струму у нульовому проводі.
7. Як розраховують активну, реактивну та повну потужності?
8. Як визначити коефіцієнт потужності окремої фази споживача і всієї трифазної системи?

## 2 ВИПРЯМНІ ПРИСТРОЇ ТА ЗГЛАДЖУВАЛЬНІ ФІЛЬТРИ

### 2.1 Короткі теоретичні відомості

Випрямними називаються пристрої, в яких здійснюється перетворення змінного струму в постійний. Принцип їх дії базується на забезпеченні приєднання до джерела енергії навантаження таким чином, щоб в ньому проходив струм в одному напрямку. Випрямлена напруга – це напруга на виході випрямляча.

В загальному випадку випрямляч складається з трансформатора, вентилів (напівпровідникових діодів) та згладжувального фільтра. Основними параметрами випрямляча є:

- середнє значення випрямленої напруги  $U_0$ ;
- середнє значення випрямленого струму  $I_0$ ;
- коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги  $K_{П}$ ;
- частота мережі  $f_M$ ;
- частота пульсацій  $f_{П}$ .

На рисунках 2.1 – 2.3 наведені принципові схеми випрямлячів однофазного змінного струму: однопівперіодного, двопівперіодного з виводом середньої точки трансформатора, мостового. На цих же рисунках поряд зі схемами наведені різні види навантажень, які застосовуються для відповідних випрямлячів.

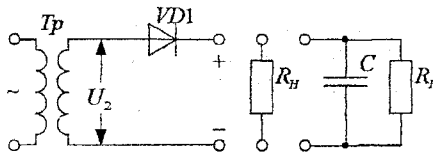


Рисунок 2.1 – Однопівперіодна схема випрямлення

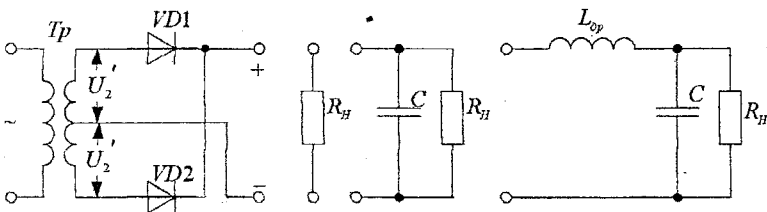


Рисунок 2.2 – Двопівперіодна схема випрямлення з виведенням середньої точки трансформатора

Випрямлена напруга, крім постійної складової  $U_0$ , містить в собі також змінну складову, амплітуда і частота якої визначаються схемою

випрямного пристрою та схемою і параметрами навантаження. Вміст змінної складової у кривій випрямленої напруги визначається коефіцієнтом пульсацій:

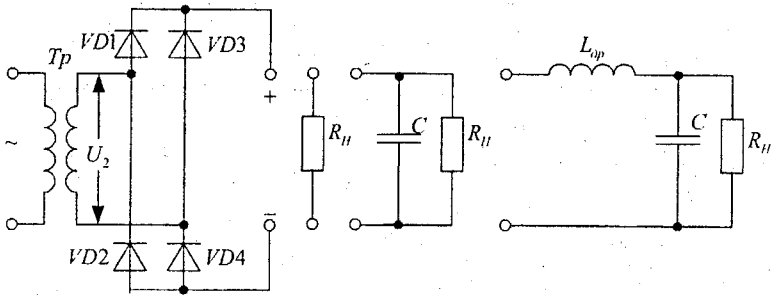


Рисунок 2.3 – Мостова схема випрямлення

$$K_{II} = \frac{U_{zm}}{U_0}, \quad (2.1)$$

де  $U_{zm}$  - амплітуда змінної складової випрямленої напруги;  $U_0$  - середнє значення випрямленої напруги.

Користуючись апаратом перетворення Фур'є, визначимо значення величин  $U_{m1}$  та  $U_0$  і коефіцієнта пульсацій  $K_{II}$  для схеми *однопівперіодного випрямляча* (рисунок 2.1) при його активному навантаженні. При цьому врахуємо, що змінна складова випрямленої напруги фактично визначається амплітудою її першої гармоніки  $U_{m1}$ .

$$\begin{aligned} U_{m1} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \cdot \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{2\pi} \int_0^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{U_{2m}}{2\pi} \left( \omega t \Big|_0^{\pi} - \frac{\sin 2\omega t}{2} \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{U_{2m}}{2}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = -\frac{U_{2m}}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = \frac{U_{2m}}{2\pi} + \frac{U_{2m}}{2\pi} = \frac{U_{2m}}{\pi}. \quad (2.3)$$

$$K_{II} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (2.4)$$

З аналізу роботи схеми однопівперіодного випрямляча видно, що синусоїдальні імпульси на активному навантаженні з'являються з періодом, який дорівнює періоду змінної напруги, тобто частота пульсацій дорівнює частоті мережі:

$$f_{II} = f_M. \quad (2.5)$$

Зі схеми також видно, що зворотна напруга, яка діє на діод, дорівнює амплітуді напруги на вторинній обмотці трансформатора:

$$U_{зв} = U_{2m}. \quad (2.6)$$

Однопівперіодну схему використовують при потужностях до 10 Вт, де немає жорстких вимог до коефіцієнта пульсацій. До її переваг відносять мінімальну кількість елементів та низьку вартість.

**Двопівперіодний випрямляч з виведенням середньої точки трансформатора** (рисунок 2.2) забезпечує струм у навантаженні протягом обох півперіодів змінної напруги, яка діє на його вході. Це змінює всі основні показники цього випрямляча порівняно з попередньою схемою, а саме:

постійна складова випрямленої напруги

$$U_0 = \frac{2 \cdot U'_{2m}}{\pi}; \quad (2.7)$$

частота пульсацій випрямленої напруги

$$f_{\Pi} = 2 \cdot f_M; \quad (2.8)$$

зворотна напруга на кожному діоді

$$U_{зв} = 2 \cdot U'_{2m}. \quad (2.9)$$

В наведених формулах  $U'_{2m}$  - напруга на півобмотці вторинної обмотки трансформатора.

Використовують такі випрямлячі при вихідних потужностях до сотень Вт та вихідних напругах до 500 В частіше при навантаженнях з смісною та індуктивною реакцією. До переваг відносять підвищену частоту пульсацій та мінімальну кількість вентилів, до недоліків – дещо ускладнену конструкцію трансформатора та його гірше використання порівняно з мостовою схемою.

**Мостова схема випрямлення**, рисунок 2.3, як і попередня, є також двопівперіодною. Тому ряд показників збігаються з показниками попередньої схеми, хоча є і відмінності. Наведемо їх на основі вже отриманих результатів для інших схем з урахуванням особливостей принципової схеми:

постійна складова випрямленої напруги

$$U_0 = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi}; \quad (2.10)$$

частота пульсацій випрямленої напруги

$$f_{\Pi} = 2 \cdot f_M; \quad (2.11)$$

зворотна напруга на кожному діоді

$$U_{зв} = U_{2m}. \quad (2.12)$$

В наведених формулах  $U_{2m}$  - напруга на вторинній обмотці трансформатора.

Мостова схема характеризується достатнім використанням потужності трансформатора, тому рекомендується при вихідних потужностях до 1000 Вт і більше. З наведених формул видно, що для отримання однакої за величиною випрямленої напруги у схемі з виведенням середньої точки трансформатора напруга на вторинній обмотці повинна бути вдвічі більшою, ніж у мостовій схемі. Крім цього, з порівняння формул (2.9) і (2.12) видно, що за умови отримання однакої напруги  $U_0$  зворотна напруга на кожному діоді в мостовій схемі вдвічі менша, ніж у схемі з виведенням середньої точки трансформатора.

**Однопівперіодна трифазна схема з нульовим виведенням вторинної обмотки трансформатора** наведена на рисунку 2.4. Зазначимо, що первинні обмотки трансформатора можуть бути з'єднані зіркою або трикутником. Поряд зі схемою наведені різні навантаження, які можуть застосовуватися на практиці.

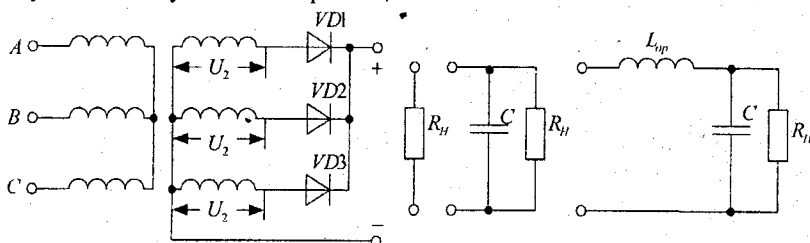


Рисунок 2.4 – Однопівперіодна трифазна схема

Аналіз роботи схеми показує, що в будь-який момент працює тільки одна фаза – та, у якій напруга найбільша, причому кожна фаза працює протягом періоду лише один раз і тривалість її роботи становить третину періоду. Отже, випрямлена напруга має форму кривої, яка є обвідною кривих *ers* всіх фаз (див. рисунок 1.1). З точки зору перетворення Фур'є випрямлена напруга – це періодична послідовність вершин синусоїдальних імпульсів, тривалістю  $2\pi/3$ , що дозволяє визначити постійну складову випрямленої напруги:

$$U_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} U_{2m} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \approx 0,83 \cdot U_{2m} \approx 1,17 \cdot U_2, \quad (2.13)$$

де  $U_{2m}$  і  $U_2$  – відповідно амплітудне і ефективне значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Крім наведеної величини постійної складової випрямленої напруги (2.13), зазначимо також і інші важливі показники однопівперіодної трифазної схеми: частота пульсацій випрямленої напруги становить

$$f_{II} = 3 \cdot f_M; \quad (2.14)$$

коефіцієнт пульсацій  $K_{II} = 0,25$ ; максимальна величина зворотної напруги на кожному діоді дорівнює лінійній напрузі трифазної мережі на вторинній обмотці трансформатора

$$U_{zg} = U_{л}. \quad (2.15)$$

Струм вторинної обмотки фази трансформатора тече тільки в одному напрямку, підмагнічуючи магнітопровід.

Однопівперіодна трифазна схема забезпечує рівномірне навантаження на трифазну мережу і застосовується для випрямлення середніх потужностей (1–50 кВт) та не дуже високих напруг (до 5–7 кВ). Ця схема часто використовується у випрямлячах для зарядки акумуляторів, оскільки в цьому випадку хороше згладжування пульсацій не є обов'язковим.

**Мостова трифазна схема випрямлення (схема Ларіонова)** наведена на рисунку 2.5. Діоди VD1, VD3, VD5 складають анодну групу, а діоди VD2, VD4 і VD6 – катодну групу. Поруч зі схемою випрямляча наведені можливі види навантажень.

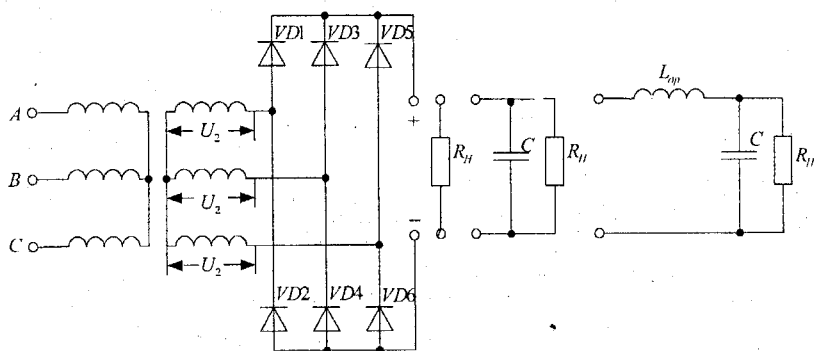


Рисунок 2.5 – Мостова трифазна схема випрямлення

Аналіз роботи наведеної схеми показує, що протягом одного періоду змінної вхідної напруги працює шість різних комбінацій діодів і це створює таку ж кількість імпульсів у випрямленій напрузі. Це не може не відбитися на основних параметрах випрямляча.

Отже, частота пульсацій випрямленої напруги становить

$$f_{II} = 6 \cdot f_M; \quad (2.16)$$

величина постійної складової випрямленої напруги

$$U_0 = 2 \cdot 1,17 \cdot U_2 = 2,34 \cdot U_2; \quad (2.17)$$

коефіцієнт пульсацій  $K_{II} = 0,057$ ; максимальна зворотна напруга на закритому вентилі дорівнює амплітуді лінійної напруги на вторинній обмотці

$$U_{zg} = U_{л}. \quad (2.18)$$

Мостова схема має суттєві переваги порівняно з однопівперіодною (крім відображених в аналітичному вигляді (2.16) і (2.17)), а саме: розрахункова потужність трансформатора всього на 5% перевищує потужність випрямленого струму, тоді як в однопівперіодній схемі – на 35%, відсутнє підмагнічування магнітопроводу трансформатора.

Для зменшення пульсацій випрямленої напруги паралельно навантаженню вмикають конденсатор великої ємності. В цьому випадку протягом певного часу імпульси струму заряджають конденсатор, а протягом решти часу – ємність віддає у зовнішнє коло енергію. Напруга на конденсаторі  $U_C$  при його заряді від джерела  $U$  змінюється за законом:

$$U_C = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (2.19)$$

де  $\tau_2 = (R_B \parallel R_H) \cdot C \approx R_B \cdot C$ ;  $R_B = R_D + R_{Tp} = R_D + r_2 + \frac{r_1}{n^2}$  - внутрішній опір випрямляча;  $R_D$  - опір діода в прямому напрямку;  $r_1$  і  $r_2$  - опори первинної і вторинної обмоток сілового трансформатора;  $n = \frac{w_1}{w_2}$  - коефіцієнт трансформації.

**Розряд** конденсатора відбувається за законом:

$$U_C = U e^{-\frac{t}{\tau_r}}, \quad (2.20)$$

де  $\tau_r = (R_H \parallel R_{ze}) \cdot C \approx R_H \cdot C$ ;  $R_{ze}$  - зворотний опір діода.

В зв'язку з тим, що  $R_B \ll R_H$ , стала часу заряду  $\tau$ , також значно менша сталої часу розряду  $\tau_r$ . З цієї причини заряд конденсатора відбувається значно швидше, ніж його розряд. Тому напруга на навантаженні, а отже і струм в ньому, змінюються протягом періоду вхідної напруги значно менше, ніж при активному навантаженні.

При живленні більшості електронних пристроїв допускаються дуже невеликі пульсації випрямленої напруги. Використання одного лише конденсатора не завжди вирішує проблему. Більш ефективними для цього є згладжувальні фільтри. **Згладжувальним фільтром** випрямляча називають пристрій, призначений для зменшення змінної складової випрямленої напруги. На практиці широко застосовують Г-подібні LC- та RC-фільтри (LC-фільтри наведені на рисунках 2.2-2.5). В схемі RC-фільтра замість індуктивності (дроселя) встановлюється резистор. Фільтри можуть бути одноланковими, дволанковими тощо.

**Основним параметром** згладжувальних фільтрів є **коефіцієнт згладжування пульсацій** – відношення коефіцієнта пульсацій на вході фільтра до коефіцієнта пульсацій на його виході (навантаженні):

$$q = \frac{K_{\text{вх}}}{K_{\text{вих}}}. \quad (2.21)$$

Формулу (2.21) з урахуванням (2.1) можна записати таким чином:

$$q = \frac{U_{зм1}}{U_{01}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{зм2}} = \frac{K_0}{K_{зм}}, \quad (2.22)$$

де  $U_{зм1}$  і  $U_{зм2}$  – амплітуди змінної складової випрямленої напруги відповідно на вході і виході фільтра;  $U_{01}$  і  $U_{02}$  – постійні складові випрямленої напруги на вході і виході фільтра, відповідно;  $K_0$  і  $K_{зм}$  – коефіцієнти передачі фільтра постійної та змінної складових, відповідно.

Визначимо тепер коефіцієнти згладжування пульсацій для  $LC$ - і  $RC$ -фільтрів.

Можна вважати, що для  $LC$ -фільтра коефіцієнт передачі постійної напруги дорівнює одиниці, оскільки падінням постійної напруги на дроселі  $L_{др}$  можна знехтувати, тобто  $K_0 \approx 1$ . При визначенні коефіцієнта передачі змінної складової доцільно врахувати, що для ефективного згладжування пульсацій в такому фільтрі необхідне виконання таких умов:

$$X_C \ll R_H, \quad X_C \ll X_L, \quad R_H \ll X_L, \quad (2.23)$$

де реактивні опори  $X_C$  і  $X_L$  визначаються для частоти першої гармоніки пульсацій. Отже:

$$K_{зм} = \frac{R_H \cdot \frac{1}{j\omega_{II}C}}{\left(R_H + \frac{1}{j\omega_{II}C}\right)} \cdot \frac{R_H \cdot \frac{1}{j\omega_{II}C}}{\left(R_H + \frac{1}{j\omega_{II}C}\right) + j\omega_{II}L_{др}} \approx \frac{1}{j\omega_{II}C \cdot j\omega_{II}L_{др}}. \quad (2.24)$$

Таким чином, коефіцієнт згладжування пульсацій для  $\Gamma$ -подібних однолапкових  $LC$ -фільтрів може бути визначений за формулою:

$$q \approx \left| \frac{1}{K_{зм}} \right| \approx 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{II}^2 \cdot L \cdot C. \quad (2.25)$$

Для згладжувального  $\Gamma$ -подібного  $RC$ -фільтра, схема якого наведена на рисунку 2.6, також справедливе співвідношення (2.22), що визначає його коефіцієнт згладжування пульсацій. Але коефіцієнти передачі  $K_0$  і  $K_{зм}$ , очевидно, будуть мати інші значення.

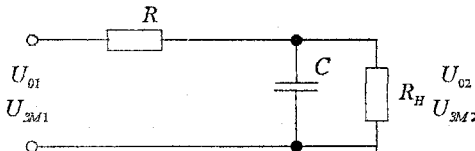


Рисунок 2.6 –  $\Gamma$ -подібний  $RC$ -фільтр

Коефіцієнт передачі постійної складової:

$$K_0 = \frac{R_{II}}{R_{II} + R}. \quad (2.26)$$

Коефіцієнт передачі змінної складової визначимо з урахуванням таких умов, які є обов'язковими для ефективного згладжування пульсацій:

$$X_C \ll R_{II}, \quad X_C \ll R. \quad (2.27)$$

$$K_{zv} = \frac{R_{II} \cdot \frac{1}{j\omega_{II}C}}{R_{II} \cdot \frac{1}{j\omega_{II}C} \left( R_{II} + \frac{1}{j\omega_{II}C} \right)} \approx \frac{1}{j\omega_{II}CR}. \quad (2.28)$$

$$\frac{R_{II} \cdot \frac{1}{j\omega_{II}C}}{\left( R_{II} + \frac{1}{j\omega_{II}C} \right) + R}$$

Таким чином, коефіцієнт згладжування пульсацій для Г-подібних одноланкових RC-фільтрів визначається за такою формулою:

$$q = \left| \frac{K_0}{K_{zv}} \right| = 2 \cdot \pi \cdot f_{II} \cdot R \cdot C \cdot \frac{R_{II}}{R_{II} + R}. \quad (2.29)$$

Для збільшення коефіцієнта згладжування застосовують дволанкові фільтри. При великому значенні коефіцієнта згладжування вигідніше застосовувати саме дволанкові фільтри, які отримують послідовним з'єднанням одноланкових. Для практичних розрахунків можна вважати, що коефіцієнт згладжування дволанкового фільтра дорівнює добутку коефіцієнтів згладжування кожної ланки:

$$q = q_1 \cdot q_2. \quad (2.30)$$

Особливістю LC-фільтрів є незначний спад постійної складової випрямленої напруги на дроселі, що дає змогу їх застосовувати в пристроях з порівняно великим струмом навантаження. Істотним недоліком таких фільтрів є велика маса дроселя, а також наявність навколо нього магнітних полів, які можуть впливати на роботу високочутливих вузлів апаратури.

В RC-фільтрі створюється відносно велике падіння напруги на резисторі  $R$ , отже, мають місце значні втрати на ньому енергії. Тому такі фільтри доцільно використовувати при невеликих струмах навантаження (до 15 мА). RC-фільтри вигідно відрізняються від LC-фільтрів меншими габаритними розмірами та низькою вартістю, що обумовлено в першу чергу використанням стандартного елемента – резистора.

## 2.2 Приклади розв'язання задач

**Приклад 1.** У схемі однопівперіодного випрямляча (див. рисунок 2.1) через діод протікає випрямлений струм  $75 \text{ мА}$ . Визначити опір активного навантаження, якщо амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора становить  $200 \text{ В}$ .

### Розв'язання

За формулою (2.3) визначимо постійну складову випрямленої напруги на активному навантаженні:

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{200}{3,14} = 63,7 \text{ В.}$$

Опір навантаження:

$$R_H = \frac{U_0}{I_0} = \frac{63,7}{75 \cdot 10^{-3}} = 850 \text{ Ом.}$$

**Приклад 2.** Для схеми двоівперіодного випрямляча з індуктивним згладжувальним фільтром, рисунок 2.7, визначити коефіцієнт згладжування пульсацій, якщо відомо, що амплітуда напруги вторинної півобмотки трансформатора  $U'_{2m} = 300 \text{ В}$ , постійна складова випрямленого струму, який проходить через навантаження дорівнює  $200 \text{ мА}$ , частота мережі  $50 \text{ Гц}$ , індуктивність дроселя –  $10 \text{ Гн}$ .

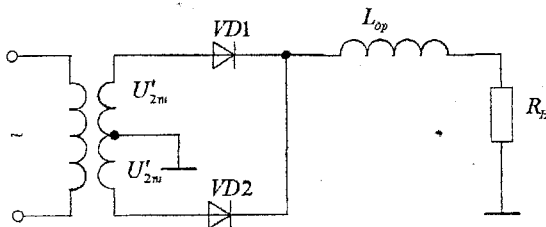


Рисунок 2.7 – Двоівперіодний випрямляч з індуктивним згладжувальним фільтром

### Розв'язання

Визначимо величину випрямленої напруги на навантаженні за формулою (2.7):

$$U_0 = \frac{2 \cdot U'_{2m}}{\pi} = \frac{2 \cdot 300}{3,14} = 191 \text{ В.}$$

Опір навантаження:

$$R_H = \frac{U_0}{I_0} = \frac{191}{200 \cdot 10^{-3}} = 955 \text{ Ом.}$$

Для визначення коефіцієнта згладжування пульсацій в наведеній схемі слід врахувати, що послідовно з'єднані дросель та навантаження складають подільник, змінна напруга на елементах якого розподіляється пропорційно їх опорам. Визначимо індуктивний опір дроселя:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f_{II} \cdot L_{op} = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10 = 6280 \text{ Ом.}$$

Враховуючи, що індуктивний опір майже на порядок більший від опору навантаження, коефіцієнт пульсацій визначимо за формулою:

$$K_{II} = \frac{X_L}{R_{II}} = \frac{6280}{955} = 6,6.$$

**Приклад 3.** Для однофазної мостової схеми випрямлення використовується згладжувальний  $LC$ -фільтр. Постійні складові випрямлених напруги і струму становлять відповідно  $20 \text{ В}$  і  $1 \text{ А}$  (максимальне значення струму). Опір навантаження становить  $R_{II} = 50 \text{ Ом}$ , амплітуди змінної складової на вході і виході фільтра –  $U_{зм1} = 15 \text{ В}$ ,  $U_{зм2} = 1 \text{ В}$ , частота мережі –  $400 \text{ Гц}$ . Розрахувати величини індуктивності та ємності фільтра, які б забезпечували виконання заданих умов.

#### Розв'язання

Враховуючи формулу (2.22), в якій для  $LC$ -фільтра  $K_D = 1$ , визначимо необхідний коефіцієнт згладжування пульсацій:

$$q = \frac{U_{зм1}}{U_{зм2}} = \frac{15}{1} = 15.$$

За формулою (2.25) розрахуємо добуток  $LC$ :

$$LC = \frac{q}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{II}^2} = \frac{15}{4 \cdot 3,14^2 \cdot (2 \cdot 400)^2} \approx 0,6 \cdot 10^{-6} (\text{Гн} \cdot \text{Ф}).$$

З добутку  $LC$  потрібно визначити величини індуктивності та ємності. При виборі величини індуктивності слід забезпечити індуктивну реакцію фільтра на випрямляч. При цьому будуть стабільнішими характеристики випрямляча, менше діюче значення струму у вентилях, а також менша габаритна потужність трансформатора. Для забезпечення індуктивної реакції фільтра необхідно знайти **критичне** значення індуктивності дроселя і вибрати  $L > L_{кр}$ . Отже, визначимо критичне значення індуктивності:

$$L_{кр} = \frac{R_{II}}{(m^2 - 1) \cdot \pi \cdot f_{II}} = \frac{50}{(2^2 - 1) \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 400} = 6,6 \text{ мГн.}$$

*Примітка.* Значення параметра  $m$  залежить від схеми випрямляча; для однофазної мостової  $m = 2$ , для однопівперіодної трифазної –  $m = 3$ , для мостової трифазної  $m = 6$ .

Вибираємо  $L = 7 \text{ мГн} > L_{кр}$  і розраховуємо значення ємності  $C$ :

$$C = \frac{LC}{L} = \frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-3}} \approx 90 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо ємність конденсатора  $C = 100 \text{ мкФ}$ .

Зазначимо, що задана умовою задачі величина постійної складової напруги потрібна при виборі конкретного типу конденсатора, а струму – для вибору або розрахунку дроселя.

Оскільки нами приймалися дещо відмінні від розрахункових значення індуктивності і ємності фільтра, визначимо фактичне значення коефіцієнта пульсацій:  $q_{\phi} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot 400)^2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \approx 18$ .

### 2.3 Задачі

2.3.1. Амплітуда напруги вторинної півобмотки трансформатора двопівперіодної схеми випрямлення з середньою точкою становить  $210 \text{ В}$ . Визначити випрямлений струм, що проходить через кожний діод, якщо опір навантаження дорівнює  $510 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $I_0 = 131 \text{ мА}$ .

2.3.2. В схемі однопівперіодного випрямляча на активному навантаженні  $R_H = 510 \text{ Ом}$  постійна напруга дорівнює  $100 \text{ В}$ . Чи правильно вибраний діод  $D205$ , для якого максимальна зворотна напруга становить  $400 \text{ В}$ , а найбільший випрямлений струм –  $400 \text{ мА}$ ?

Відповідь: діод вибраний правильно.

2.3.3. Для схеми однопівперіодного випрямляча визначити постійну складову випрямленої напруги, якщо амплітуда напруги первинної обмотки трансформатора дорівнює  $220 \text{ В}$ , а коефіцієнт трансформації  $n = 1,43$ .

Відповідь:  $U_0 = 49 \text{ В}$ .

2.3.4. Для схеми однопівперіодного випрямляча визначити постійну складову випрямленої напруги на активному навантаженні, якщо на вторинній обмотці трансформатора амплітуда напруги  $U_{2m} = 250 \text{ В}$ .

Відповідь:  $U_0 = 80 \text{ В}$ .

2.3.5. В схемі двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора через активне навантаження проходить постійний струм величиною  $600 \text{ мА}$ . Чи можна в такій схемі використати діоди типу  $D229\text{В}$ , у яких найбільший середній прямий струм не перевищує  $400 \text{ мА}$ ?

Відповідь: діоди  $D229\text{В}$  використати можна.

2.3.6. Визначити частоту пульсацій першої гармоніки напруги на навантаженні двопівперіодного випрямляча, якщо напруга первинної обмотки трансформатора має частоту  $400 \text{ Гц}$ .

Відповідь:  $f_H = 800 \text{ Гц}$ .

2.3.7. Для схеми двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора визначити випрямлену напругу на навантаженні, якщо діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора  $U_2' = 120 \text{ В}$ .

Відповідь:  $U_0 = 108 \text{ В}$ .

2.3.8. В схемі двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора зворотна напруга, яка діє на кожний діод, дорівнює  $471,2 \text{ В}$ . Визначити постійну складову випрямленої напруги на активному навантаженні.

Відповідь:  $U_0 = 150 \text{ В}$ .

2.3.9. Визначити амплітуду імпульсів змінної напруги на активному навантаженні у схемі двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора, якщо випрямлений струм, що проходить через кожен діод, дорівнює  $70 \text{ мА}$ , а опір навантаження становить  $39 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $U_{2m}' = 8,6 \text{ В}$ .

2.3.10. Визначити постійну складову випрямленої напруги на активному навантаженні однофазної мостової схеми випрямляча, якщо амплітуда напруги первинної обмотки трансформатора дорівнює  $150 \text{ В}$ , а коефіцієнт трансформації трансформатора становить  $n = 2$ .

Відповідь:  $U_0 = 48 \text{ В}$ .

2.3.11. В однофазній мостовій схемі випрямлення зворотна напруга на діодах дорівнює  $235,5 \text{ В}$ . Визначити величину постійної складової струму, який проходить через кожний діод, якщо опір навантаження дорівнює  $390 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $I_{00} = 192 \text{ мА}$ .

2.3.12. Визначити діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора в схемі однофазного мостового випрямляча, якщо через кожний діод тече струм  $I_{00} = 150 \text{ мА}$ , а опір навантаження дорівнює  $430 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $U_2 = 143,6 \text{ В}$ .

2.3.13. Для однофазної мостової схеми випрямлення визначити величину зворотної напруги на діодах, якщо через кожний діод тече струм  $I_{00} = 250 \text{ мА}$ , а опір навантаження дорівнює  $680 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $U_{zc} = 533,8 \text{ В}$ .

2.3.14. Чи можна використати напівпровідниковий діод з максимально допустимим струмом  $I_{доп} = 100 \text{ мА}$  і прямим опором  $50 \text{ Ом}$  в однопівперіодному випрямлячі, який працює на активне навантаження  $250 \text{ Ом}$ , якщо ефективна напруга на вторинній обмотці трансформатора  $U_2 = 10 \text{ В}$ ?

Відповідь: діод використати можна.

2.3.15. Визначити амплітуду струму через резистор навантаження  $120 \text{ Ом}$  однофазного мостового випрямляча, якщо на вхід трансформатора надходить напруга, діюче значення якої складає  $140 \text{ В}$ , коефіцієнт

трансформації трансформатора  $n = 5$ , а прямий опір кожного напівпровідникового діода в схемі дорівнює  $10 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $I_{\text{лм}} = 0,28 \text{ А}$ .

2.3.16. У схему однопівперіодного випрямляча ввімкнаний індуктивний згладжувальний фільтр. Визначити індуктивність дроселя, якщо постійна складова випрямленого струму становить  $75 \text{ мА}$ , постійна складова випрямленої напруги  $120 \text{ В}$ , частота мережі –  $400 \text{ Гц}$ , коефіцієнт згладжування пульсацій –  $15$ .

Відповідь:  $L_{\text{оп}} = 9,55 \text{ Гн}$ .

2.3.17. Лінійна напруга (ефективне значення) на вторинних обмотках трифазного трансформатора, з'єднаних зіркою, становить  $380 \text{ В}$ . Трансформатор працює на однопівперіодний трифазний випрямляч (див. рисунок 2.4) з активним навантаженням, опір якого становить  $50 \text{ Ом}$ . Визначити величину постійної складової випрямленого струму, який тече у навантаженні.

Відповідь:  $I_0 = 5,15 \text{ А}$ .

2.3.18. Амплітудне значення фазних напруг на вторинних обмотках трифазного трансформатора, з'єднаних зіркою, дорівнює  $200 \text{ В}$ . До вторинних обмоток приєднаний однопівперіодний трифазний випрямляч, навантажений на активний опір  $10 \text{ Ом}$ . Визначити потужності постійної та змінної складових випрямленої напруги, що виділяються на цьому опорі.

Відповідь:  $P_0 = 2722,5 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{зм}} = 85 \text{ Вт}$ .

2.3.19. Активне навантаження, опір якого становить  $100 \text{ Ом}$ , приєднується до однопівперіодного трифазного випрямляча через згладжувальний дросель (схема аналогічна зображеній на рисунку 2.7). Визначити індуктивність дроселя, який би забезпечив коефіцієнт згладжування пульсацій на навантаженні  $q = 12$ , якщо випрямляч працює від мережі змінного струму  $400 \text{ Гц}$ .

Відповідь:  $L_{\text{оп}} = 160 \text{ мГн}$ .

2.3.20. Активне навантаження, опір якого становить  $100 \text{ Ом}$ , приєднується до однопівперіодного трифазного випрямляча через згладжувальний дросель (схема аналогічна зображеній на рисунку 2.7). Лінійна напруга на вторинних обмотках трифазного трансформатора, які з'єднані зіркою, дорівнює  $220 \text{ В}$  (ефективне значення), частота мережі –  $50 \text{ Гц}$ . Визначити індуктивність дроселя, який би забезпечив коефіцієнт згладжування пульсацій на навантаженні  $q = 15$ , та величину струму, на яку повинен бути розрахований дросель.

Відповідь:  $L_{\text{оп}} = 1,6 \text{ Гн}$ ;  $I_0 = 1,5 \text{ А}$ .

2.3.21. Лінійна напруга (ефективне значення) на вторинних обмотках трифазного трансформатора, з'єднаних зіркою, становить  $15 \text{ В}$ . Трансформатор працює на мостовий трифазний випрямляч (див. рисунок 2.5) з активним навантаженням, опір якого становить  $50 \text{ Ом}$ . Визначити величину постійної складової випрямленого струму, який тече у навантаженні.

Відповідь:  $I_0 = 0,41 \text{ A}$ .

2.3.22. Амплітудне значення фазних напруг на вторинних обмотках трифазного трансформатора, з'єднаних зіркою, дорівнює  $141 \text{ В}$ . До вторинних обмоток приєднаний мостовий трифазний випрямляч, навантажений на активний опір  $100 \text{ Ом}$ . Визначити потужності постійної та змінної складових випрямленої напруги, що виділяються на цьому опорі.

Відповідь:  $P_0 = 547,56 \text{ Вт}$ ;  $P_{зм} = 0,88 \text{ Вт}$ .

2.3.23. Активне навантаження, опір якого становить  $200 \text{ Ом}$ , приєднується до мостового трифазного випрямляча через згладжувальний дросель (схема аналогічна зображеній на рисунку 2.7). Визначити індуктивність дроселя, який би забезпечив коефіцієнт згладжування пульсацій на навантаженні  $q = 10$ , якщо випрямляч працює від мережі змінного струму  $50 \text{ Гц}$ .

Відповідь:  $L_{др} = 1,06 \text{ Гн}$ .

2.3.24. Активне навантаження, опір якого становить  $100 \text{ Ом}$ , приєднується до мостового трифазного випрямляча через згладжувальний дросель (схема аналогічна зображеній на рисунку 2.7). Лінійна напруга на вторинних обмотках трифазного трансформатора, які з'єднані зіркою, дорівнює  $220 \text{ В}$  (ефективне значення), частота мережі –  $400 \text{ Гц}$ . Визначити індуктивність дроселя, який би забезпечив коефіцієнт згладжування пульсацій на навантаженні  $q = 10$ , величину струму, на яку повинен бути розрахований дросель, та амплітуду змінної напруги на активному навантаженні.

Відповідь:  $L_{др} = 66 \text{ мГн}$ ;  $I_0 = 3 \text{ А}$ ;  $U_{зм} = 1,7 \text{ В}$ .

2.3.25. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги на виході двопівперіодного випрямляча використовується  $RC$ -фільтр (див. рисунок 2.6). Необхідно визначити величини  $R$  і  $C$ , які б забезпечили коефіцієнт пульсацій напруги на навантаженні  $0,03$  при коефіцієнті пульсацій на вході фільтра  $0,67$ . На навантаженні повинна створюватися постійна напруга  $700 \text{ В}$  при постійному струмі  $10 \text{ мА}$ . Частота мережі –  $50 \text{ Гц}$ .

*Вказівка: для забезпечення коефіцієнта корисної дії  $RC$ -фільтра, не меншого  $0,8$ , опір резистора  $R$  вибирають із співвідношення  $R = 0,25R_H$ .*

Відповідь:  $R = 9,1 \text{ кОм}$ ;  $C = 5,0 \text{ мкФ}$ .

2.3.26. Змінна складова на вході  $LC$ -фільтра, під'єданого до виходу однофазного мостового випрямляча, має амплітуду  $1,5 \text{ В}$ , а на виході –  $0,15 \text{ В}$ . Визначити амплітуду змінної складової на виході такого ж фільтра, якщо його приєднати:

а) до виходу однопівперіодного трифазного випрямляча з амплітудою змінної складової  $1 \text{ В}$ ;

б) до виходу мостового трифазного випрямляча з амплітудою змінної складової  $0,8 \text{ В}$ .

Відповідь: а)  $U_{зм2} = 44 \text{ мВ}$ ; б)  $U_{зм2} = 9 \text{ мВ}$ .

2.3.27. При використанні  $RC$ -фільтра на виході двопівперіодної схеми випрямлення коефіцієнт згладжування пульсації становить 10. Визначити амплітуду змінної складової на навантаженні такого фільтра, якщо його використали для трифазної мостової схеми. Коефіцієнт пульсації на вході  $RC$ -фільтра при його роботі від мостового трифазного випрямляча становить 0,057, постійна складова випрямленої напруги – 15 В.

Відповідь:  $U_{zm2} = 28,5$  мВ.

2.3.28. Як зміниться коефіцієнт згладжування пульсації  $LC$ -фільтра, якщо його перемкнути з виходу однофазної двопівперіодної схеми випрямлення на вихід трифазної мостової схеми і:

а) одночасно зменшити індуктивність дроселя в два рази, залишивши без змін ємність конденсатора, тобто  $C = const$ ;

б) одночасно зменшити ємність конденсатора в два рази, залишивши без змін індуктивність дроселя, тобто  $L = const$ ;

в) одночасно зменшити і ємність конденсатора, і індуктивність дроселя в два рази;

г) не змінювати параметрів  $LC$ -фільтра.

Пояснити отримані результати.

Відповідь: а) збільшиться у 4,5 рази; б) збільшиться у 4,5 рази;

в) збільшиться у 2,25 рази; г) збільшиться у 9 разів.

## 2.4 Лабораторна робота №2

### “Дослідження властивостей і характеристик випрямних пристроїв та згладжувальних фільтрів”

**Мета роботи** – виконати дослідження однофазних та трифазних схем випрямлення при їх роботі на активне і активно-ємнісне навантаження та дослідити властивості і характеристики згладжувальних  $LC$ - та  $RC$ -фільтрів.

#### Опис лабораторного стенда

Для виконання роботи використовується два лабораторних стенди: “Блок вентилів” та “Згладжувальні фільтри і навантаження”.

У блоці вентилів напівпровідникові діоди з’єднані таким чином, що створена можливість зібрати такі випрямні пристрої:

- однопівперіодну однофазну схему випрямлення;
- двопівперіодну однофазну схему випрямлення з виведенням середньої точки трансформатора;
- мостову однофазну схему випрямлення;
- однопівперіодну трифазну схему випрямлення;
- мостову трифазну схему випрямлення.

Вказані схеми випрямлячів створюються лише шляхом відповідного під'єднання діодів до джерела змінного струму – лабораторного трифазного генератора, схема якого наведена на рисунку 1.10.

У блоці згладжувальних фільтрів і навантажень змонтовані окремі активні навантаження ( $R3, R4$ ), активно-ємнісні навантаження ( $R5, C5; R6, C6$ ), два Г-подібних однакових LC-фільтри та два Г-подібних однакових RC-фільтри. На передню панель блока виведені входні та вихідні гнізда усіх чотирьох фільтрів, що дозволяє виконувати дослідження згладжувальних властивостей одно- та дволанкових LC- і RC-фільтрів. Всі навантаження та фільтри мають спільну точку (“землю”), яка виведена на передню панель блока на гнізда “2”, “14”, “15” (електрично – це одна точка).

### Порядок виконання роботи

1.1. Скласти схему однопівперіодного однофазного випрямляча, до виходу якого під'єднати активне навантаження – резистор  $R4$ , керуючись при цьому схемою, наведеною на рисунку 2.8. Змінна напруга, що подається на вхід випрямляча, є однією з трьох фазних напруг на виході лабораторного трифазного генератора (на схемі показана фазна напруга  $U_A$ ).

1.2. Приєднати осцилограф до фази лабораторного трифазного генератора і отримати на його екрані *один період синусоїди* (для зручності часову розгортку встановити такою, щоб один період “займав” ціле число клітин по горизонталі). Нарисувати осцилограму, зберігши її прив'язку до клітин екрана осцилографа.

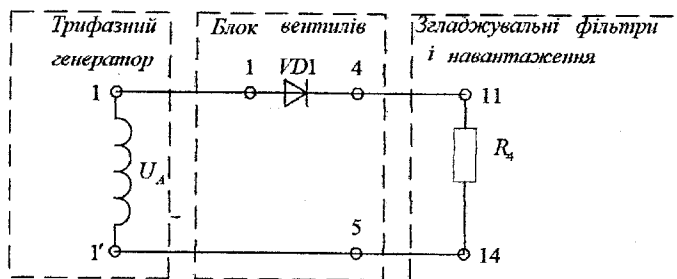


Рисунок 2.8 – Схема під'єднання однофазного однопівперіодного випрямляча з активним навантаженням

1.3. *Не змінюючи* положень органів керування осцилографа, приєднати його до активного навантаження (резистора  $R4$ ) і отримати на екрані емпору вихідної напруги випрямляча. Нарисувати осцилограму, розмістивши її під осцилограмою фазної напруги та зберігши при цьому

прийнятий для фазної напруги масштаб. Виміряти амплітуду імпульсів напруги на навантаженні випрямляча.

1.4. Від'єднати резистор  $R_4$  і приєднати до виходу випрямляча активно-емнісне навантаження  $R_5, C_5$  (схема зображена на рисунку 2.9). Отримати осцилограму напруги на навантаженні, нарисувати її. За допомогою осцилографа виміряти амплітуду змінної складової  $U_{зм5}$  та середнє значення (постійну складову) випрямленої напруги  $U_{05}$ . Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати досліджень однопівперіодного однофазного випрямляча

$R_5, C_5$			$R_6, C_6$			$RC$ -фільтр (1Г)			$RC$ -фільтр (2Г)		
$U_{зм5}$	$U_{05}$	$U_{зм6}$	$U_{06}$	$U_{зм11}$	$U_{011}$	$U_{зм21}$	$U_{021}$	$U_{зм12}$	$U_{012}$	$U_{зм22}$	$U_{022}$

1.5. Від'єднати від випрямляча активно-емнісне навантаження  $R_5, C_5$  і замість нього приєднати активно-емнісне навантаження  $R_6, C_6$  (на рисунку 2.9 таке з'єднання показано штриховою лінією від гнізда "4" до гнізда "13"). Виконати всі процедури, аналогічні попередньому пункту, а результати вимірювань  $U_{зм6}$  та  $U_{06}$  занести також до таблиці 2.1.

1.6. Від'єднати від випрямляча активно-емнісне навантаження  $R_6, C_6$  і скласти схему однопівперіодного випрямляча з  $RC$ -фільтром. Така схема наведена на рисунку 2.10. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуди змінних складових на вході і виході фільтра – відповідно  $U_{зм11}$  та  $U_{зм21}$  – і середні значення випрямленої напруги у цих же точках – відповідно  $U_{011}$  та  $U_{021}$ . Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

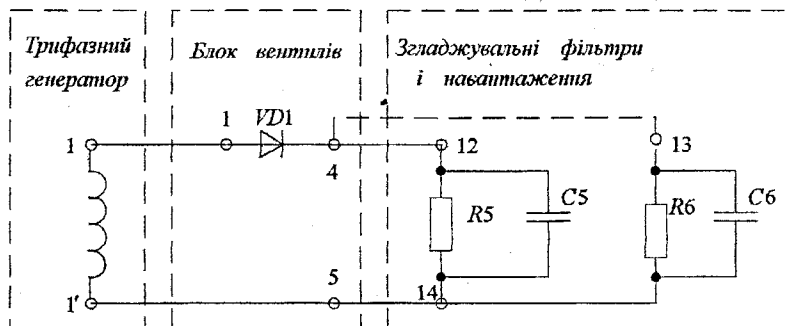


Рисунок 2.9 – Однопівперіодний однофазний випрямляч з активно-емнісним навантаженням

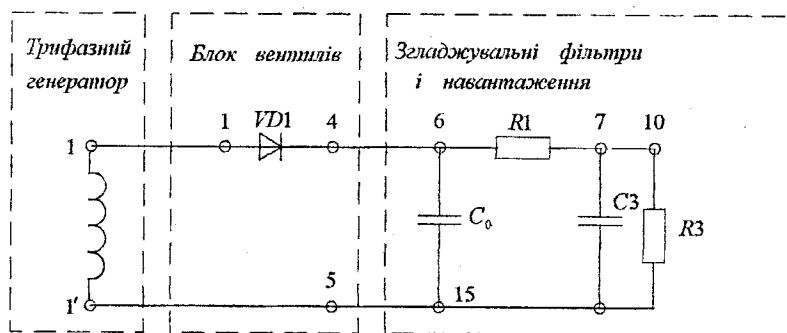


Рисунок 2.10 – Однопівперіодний однофазний випрямляч з  $RC$ -фільтром

1.7. Скласти схему дволанкового  $RC$ -фільтра (див. рисунок 2.11). Приєднати його до випрямляча і виміряти амплітуди змінних складових на вході і виході **дволанкового** фільтра – відповідно  $U_{зм12}$  та  $U_{зм22}$  – і середні значення випрямленої напруги у цих же точках – відповідно  $U_{012}$  та  $U_{022}$ . Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

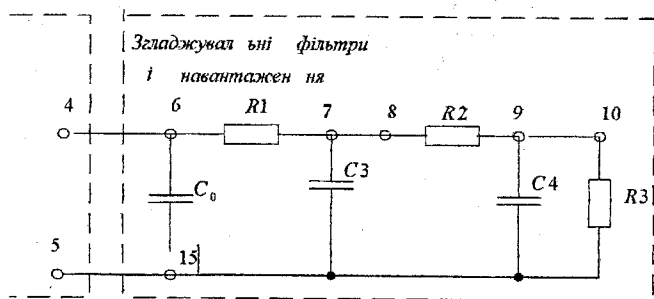


Рисунок 2.11 – Схема дволанкового  $RC$ -фільтра

1.8. Скласти схему двопівперіодного однофазного випрямляча з виведенням середньої точки трансформатора. Така схема з активним навантаженням наведена на рисунку 2.12. В якості входньої напруги використати ту фазу трифазного лабораторного генератора, в якій є виведення середньої точки "0" (на рисунку 2.12 використана фаза  $A$ ).

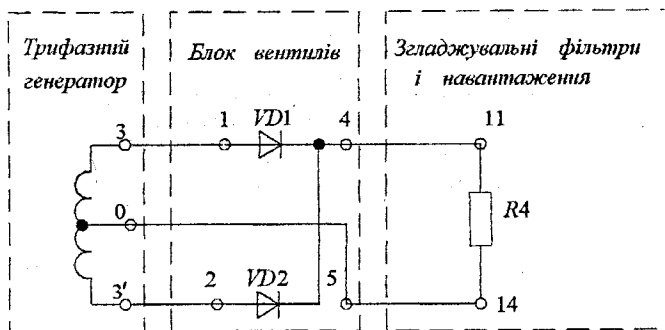


Рисунок 2.12 – Двопівперіодний однофазний випрямляч з середньою точкою трансформатора і активним навантаженням

1.9. Дослідити параметри двопівперіодного однофазного випрямляча з виведенням середньої точки трансформатора при його роботі на різні види навантаження, виконавши послідовно всі операції, наведені в пунктах 1.2-1.7. Результати вимірювань занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати досліджень двопівперіодного однофазного випрямляча з виведенням середньої точки трансформатора

R5, C5			R6, C6			RC-фільтр (1Г)			RC-фільтр (2Г)		
$U_{зм5}$	$U_{05}$	$U_{зм6}$	$U_{06}$	$U_{зм11}$	$U_{011}$	$U_{зм21}$	$U_{021}$	$U_{зм12}$	$U_{012}$	$U_{зм22}$	$U_{022}$

1.10. Скласти схему двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора і LC-фільтром. Така схема наведена на рисунку 2.13. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуди змінних складових на вході і виході фільтра – відповідно  $U_{зм13}$  та  $U_{зм23}$  – і середні значення випрямленої напруги у цих же точках – відповідно  $U_{013}$  та  $U_{023}$ . Результати вимірювань занести до таблиці 2.2 (продовження).

1.11. Скласти схему дволанкового LC-фільтра (див. рисунок 2.14). Приєднати його до випрямляча і виміряти амплітуди змінних складових на вході і виході дволанкового фільтра – відповідно  $U_{зм14}$  та  $U_{зм24}$  – і середні значення випрямленої напруги у цих же точках – відповідно  $U_{014}$  та  $U_{024}$ . Результати вимірювань занести до таблиці 2.2 (продовження).

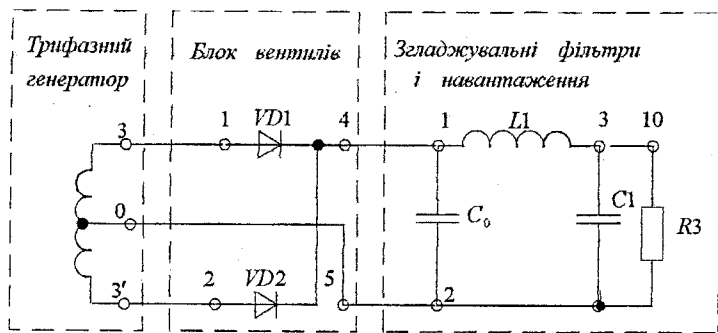


Рисунок 2.13 – Двопівперіодний однофазний випрямляч з середньою точкою трансформатора і LC-фільтром

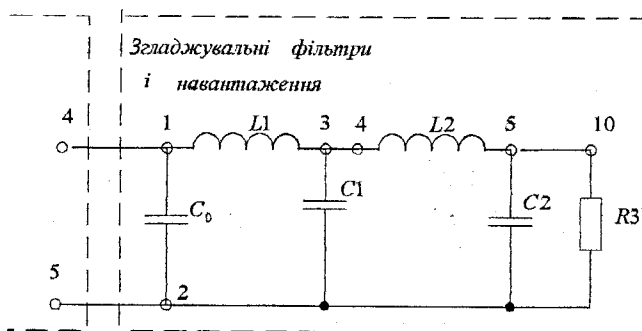


Рисунок 2.14 – Схема дволанкового LC-фільтра

Таблиця 2.2 (продовження) – Результати досліджень двопівперіодного однофазного випрямляча з виведенням середньої точки трансформатора

LC-фільтр (1Г)				LC-фільтр (2Г)			
$U_{зм13}$	$U_{013}$	$U_{зм23}$	$U_{023}$	$U_{зм14}$	$U_{014}$	$U_{зм24}$	$U_{024}$

1.12. Скласти схему мостового однофазного випрямляча. Така схема з активним навантаженням наведена на рисунку 2.15. В якості входньої напруги використати будь-яку фазу трифазного лабораторного генератора.

1.13. Дослідити параметри мостового однофазного випрямляча при його роботі на різні види навантаження, виконавши послідовно всі операції, наведені в пунктах 1.2-1.7 та пунктах 1.10 і 1.11. Результати вимірювань занести до таблиці 2.3 та таблиці 2.3 (продовження).

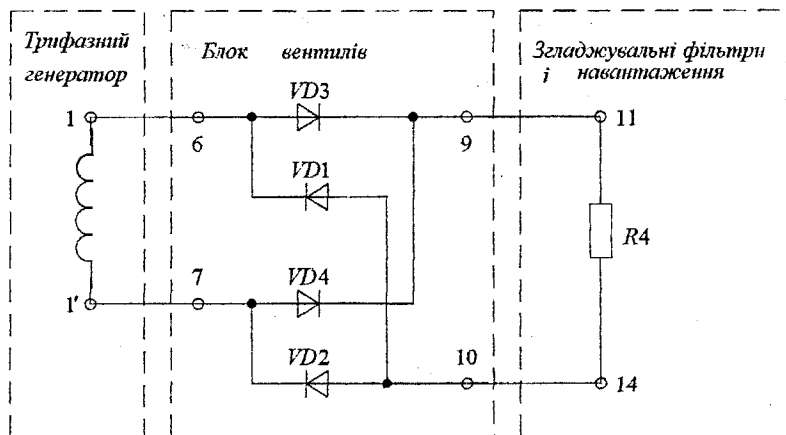


Рисунок 2.15 – Мостовий однофазний випрямляч з активним навантаженням

Таблиця 2.3 – Результати досліджень мостового однофазного випрямляча

R5, C5			R6, C6			RC-фільтр (1Г)			RC-фільтр (2Г)		
$U_{зм5}$	$U_{05}$	$U_{зм6}$	$U_{06}$	$U_{зм11}$	$U_{011}$	$U_{зм21}$	$U_{021}$	$U_{зм12}$	$U_{012}$	$U_{зм22}$	$U_{022}$

Таблиця 2.3 (продовження) – Результати досліджень мостового однофазного випрямляча

LC-фільтр (1Г)				LC-фільтр (2Г)			
$U_{зм13}$	$U_{013}$	$U_{зм23}$	$U_{023}$	$U_{зм14}$	$U_{014}$	$U_{зм24}$	$U_{024}$

1.14. Скласти схему однопівперіодного трифазного випрямляча. Така схема з активним навантаженням наведена на рисунку 2.16. Перед ввімкненням стенда обмотки трифазного лабораторного генератора з'єднати зіркою і, як показано на схемі, приєднати до входу випрямляча всі три фази та нульовий провід.

1.15. Дослідити параметри однопівперіодного трифазного випрямляча при його роботі на різних види навантаження, виконавши послідовно всі операції, наведені в пунктах 1.2-1.7 та пунктах 1.10 і 1.11. Результати вимірювань занести до таблиці 2.4 та таблиці 2.4 (продовження).

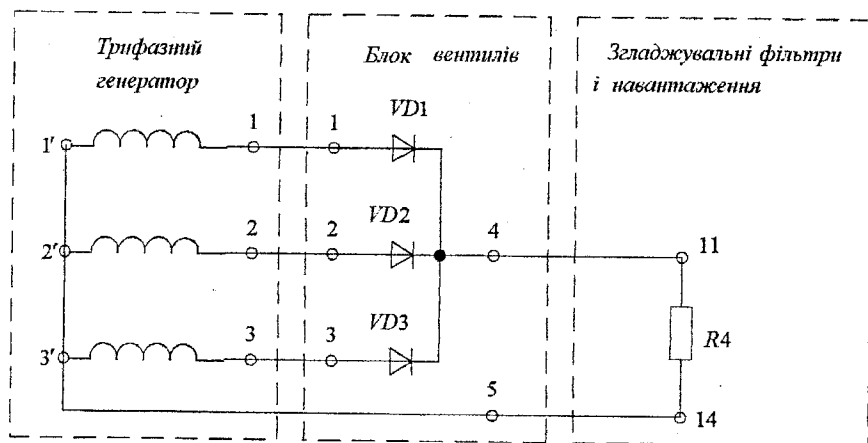


Рисунок 2.16 – Однопівперіодний трифазний випрямляч з активним навантаженням

Таблиця 2.4 – Результати досліджень однопівперіодного трифазного випрямляча

R5, C5			R6, C6			RC-фільтр (1Г)			RC-фільтр (2Г')		
$U_{зм5}$	$U_{05}$	$U_{зм6}$	$U_{06}$	$U_{зм11}$	$U_{011}$	$U_{зм21}$	$U_{021}$	$U_{зм12}$	$U_{012}$	$U_{зм22}$	$U_{022}$

Таблиця 2.4 (продовження) – Результати досліджень однопівперіодного трифазного випрямляча

LC-фільтр (1Г)				LC-фільтр (2Г')			
$U_{зм13}$	$U_{013}$	$U_{зм23}$	$U_{023}$	$U_{зм14}$	$U_{014}$	$U_{зм24}$	$U_{024}$

1.16. Скласти схему мостового трифазного випрямляча. Така схема з активним навантаженням наведена на рисунку 2.17. В якості входної напруги випрямляча використати всі фази трифазного лабораторного генератора, обмотки якого з'єднані зіркою (нульовий провід не використовується).

1.17. Дослідити параметри мостового трифазного випрямляча при його роботі на різні види навантаження, виконавши послідовно всі операції, наведені в пунктах 1.2-1.7 та пунктах 1.10 і 1.11. Результати вимірювань занести до таблиці 2.5 та таблиці 2.5 (продовження).

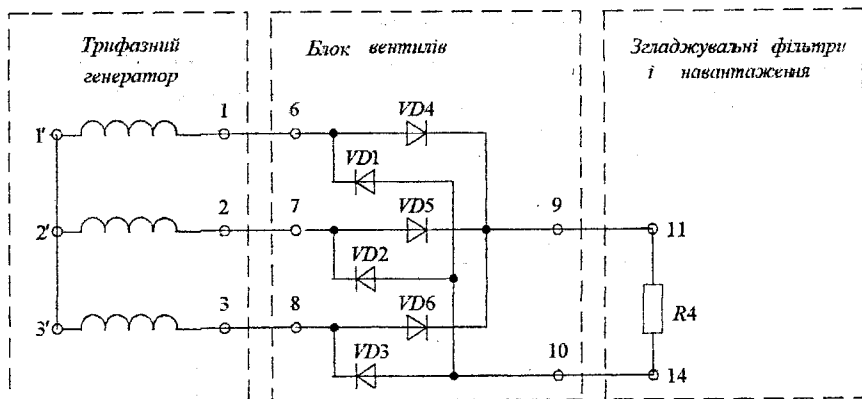


Рисунок 2.17 – Мостовий трифазний випрямляч з активним навантаженням

Таблиця 2.5 – Результати досліджень мостового трифазного випрямляча

R5, C5			R6, C6			RC-фільтр (1Г)			RC-фільтр (2Г)		
$U_{zm5}$	$U_{05}$	$U_{zm6}$	$U_{06}$	$U_{zm11}$	$U_{011}$	$U_{zm21}$	$U_{021}$	$U_{zm12}$	$U_{012}$	$U_{zm22}$	$U_{022}$

Таблиця 2.5 (продовження) – Результати досліджень мостового трифазного випрямляча

LC-фільтр (1Г)				LC-фільтр (2Г)			
$U_{zm13}$	$U_{013}$	$U_{zm23}$	$U_{023}$	$U_{zm14}$	$U_{014}$	$U_{zm24}$	$U_{024}$

### Обробка результатів

2.1. Проаналізувати зарисовані осцилограми при активному навантаженні випрямлячів і для кожної схеми випрямлення визначити частоту пульсацій та показати її зв'язок з частотою мережі.

2.2. З використанням результатів вимірювань по пунктах 1.4 та 1.5 для кожної схеми випрямлення визначити коефіцієнти пульсацій випрямленої напруги (формула 2.1). Порівняти отримані значення коефіцієнтів пульсацій для різних активно-емісійних навантажень та різних схем випрямлення. Зробити висновки.

2.3. З використанням результатів вимірювань по пунктах 1.6, 1.7, 1.10 та 1.11 для кожної схеми випрямлення визначити коефіцієнти згладжування пульсацій RC- та LC-фільтрами (формула 2.21). Порівняти

розраховані значення коефіцієнтів згладжування пульсацій для одно- і дволанкових фільтрів та різних схем випрямлення. Зробити висновки.

2.4. Визначити теоретичні значення коефіцієнтів згладжування пульсацій для *одноланкових RC-* та *LC-*фільтрів при їх роботі на виході тих випрямлячів, які підлягали експериментальним дослідженням (формули 2.25 і 2.29). Параметри елементів фільтрів та навантаження  $R_3$  наведені на лабораторних стендах. Порівняти отримані результати з експериментальними (пункт 2.3), зробити висновки.

### *Контрольні запитання*

1. Пояснити різницю між однопівперіодною та двопівперіодною схемами випрямлення.
2. Основні параметри випрямлячів.
3. Дати визначення і пояснити фізичну сутність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги.
4. Пояснити призначення та принцип роботи згладжувального фільтра.
5. В яких випадках доцільно застосовувати *RC-*фільтри, а в яких *LC-*фільтри? Обґрунтувати підходи.
6. Дати визначення і пояснити фізичну сутність коефіцієнта згладжування пульсацій згладжувальних фільтрів.
7. Як впливає на ефективність згладжування пульсацій випрямленої напруги величина сталої часу активно-емнісного навантаження?
8. Виходячи з принципу роботи згладжувальних фільтрів, пояснити залежність їх згладжувальних властивостей від типу випрямного пристрою.
9. Дати основні порівняльні характеристики *RC-* і *LC-*фільтрів.
10. На основі аналізу принципових схем випрямлячів визначити величини зворотних напруг, які діють на вентилі.
11. Пояснити принцип визначення частоти пульсацій випрямленої напруги. Навести значення частот пульсацій для різних схем випрямлення.

## 3 СТАБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

### 3.1 Короткі теоретичні відомості

Стабілізаторами напруги називаються пристрої, які автоматично підтримують напругу на боці споживача з заданим ступенем точності.

Основними дестабілізуючими факторами, які викликають зміну напруги (струму) споживача, є: коливання напруг живлення; зміни потужності, яка споживається навантаженням; коливання частоти мережі; зміна температури навколишнього середовища.

• *Промислова мережа 50 Гц може давати зміни напруги в межах (-15...+5%) від номінального значення. При живленні від малопотужних енергетичних мереж або автономних джерел коливання напруги можуть досягати (-20...+10%) і більше.*

• *Зміна потужності, що споживається апаратурою, викликає зміну струму споживача. Це змінює падіння напруги на внутрішньому опорі джерела і опорі з'єднувальних проводів. Чим більший внутрішній опір джерела і опір з'єднувальних проводів, тим більшими будуть зміни напруги при зміні струму навантаження.*

• *Колівання частоти струму мережі можуть призвести до змін вихідної напруги і змін величини пульсацій в джерелах постійного струму. Зміна температури навколишнього середовища може викликати зміну вихідної напруги (струму) через зміну параметрів елементів, що використовуються в пристроях електроживлення.*

Наведемо основні параметри стабілізаторів постійної напруги.

**Коефіцієнт стабілізації** по вхідній напрузі, який дорівнює відношенню відносних приростів напруги на вході і виході стабілізатора:

$$K_{cr} = \frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}} \bigg/ \frac{\Delta U_{вхх}}{U_{вхх}}, \text{ при } I_H = const, \quad (3.1)$$

де  $I_H$  – струм у навантаженні;  $\Delta U_{ex}$  і  $\Delta U_{вхх}$  – відповідно прирости вхідної та вихідної напруг стабілізатора;  $U_{ex}$  і  $U_{вхх}$  – номінальні значення вхідної та вихідної напруг стабілізатора, відповідно.

**Внутрішній опір** стабілізатора, який дорівнює відношенню приросту вихідної напруги до приросту струму навантаження при незмінній вхідній напрузі:

$$R_i = \frac{\Delta U_{вхх}}{\Delta I_H}, \text{ при } U_{ex} = const. \quad (3.2)$$

**Коефіцієнт згладжування пульсацій**, який визначається аналогічно визначенню цього параметра для згладжувальних фільтрів:

$$K_{\text{ЗП}} = \frac{U_{\text{зех}}}{U_{\text{вх}}} \bigg/ \frac{U_{\text{зехх}}}{U_{\text{вхх}}}, \quad (3.3)$$

де  $U_{\text{зех}}$ ,  $U_{\text{зехх}}$  – відповідно амплітуди змінних складових вхідної і вихідної напруг стабілізатора.

Серед стабілізаторів постійної напруги найбільш простими є напівпровідникові параметричні стабілізатори. Вони характеризуються невеликим коефіцієнтом стабілізації, достатньо великим внутрішнім опором (одиниці-десятки Ом) та низьким значенням коефіцієнта корисної дії. В таких стабілізаторах неможливо отримати точне значення напруги стабілізації та регулювати його.

Параметричний стабілізатор напруги виконують з використанням приладів, які мають різко нелінійну залежність напруги від струму. Найпоширенішими з них є стабілітрони та стабістори. Типова вольт-амперна характеристика стабілітрона наведена на рисунку 3.1, а на рисунку 3.2 – схема однокаскадного параметричного стабілізатора напруги.

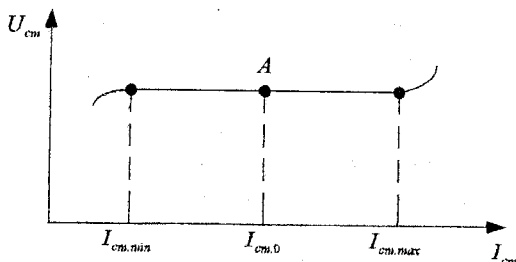


Рисунок 3.1 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

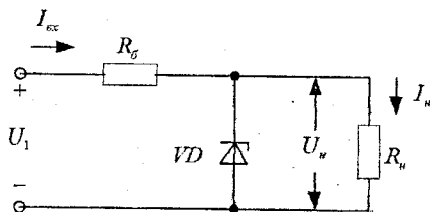


Рисунок 3.2 – Параметричний стабілізатор напруги

Стабілітрон  $VD$  працює при зворотному зміщенні (в області пробою) і вмикається паралельно навантажувальному опору  $R_H$ , на якому необхідно підтримувати постійну напругу. Робоча точка стабілітрона  $A$  в режимі стабілізації може зміщуватися в межах всієї робочої ділянки характеристики від мінімального струму стабілізації  $I_{cm.min}$  (це повністю зберігається працездатність приладу) до максимального струму стабілізації  $I_{cm.max}$  (обмежений допустимою потужністю розсіювання на стабілітроні). Послідовно з паралельно з'єднаними стабілітронем і опором навантаження, рисунок 3.2, вмикається баластний резистор  $R_G$ . Напруга стабілізації визначається напругою на стабілітроні  $VD$  при заданому струмові стабілізації. Вона є одночасно і напругою на навантаженні. В межах робочої ділянки вольт-амперної характеристики стабілітрона (від  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$ ) напруга стабілізації залишається майже незмінною при змінах у певних межах вхідної напруги, а також при змінах опору навантаження.

Для визначення опору баластного резистора необхідно для вибраного стабілітрона визначити його номінальний струм (струм в робочій точці  $A$ ) і струм через навантаження  $I_H$ . Отже:

$$I_{cm.0} = \frac{I_{cm.min} + I_{cm.max}}{2}; \quad R_G = \frac{U_1 - U_H}{I_{cm.0} + I_H}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора розраховують за формулою:

$$K_{CT} = \frac{U_H \cdot R_G}{U_1 \cdot R_{cm}}, \quad (3.5)$$

де  $R_{cm}$  – диференціальний опір стабілітрона (для однокаскадного параметричного стабілізатора диференціальний опір стабілітрона приблизно дорівнює внутрішньому опору стабілізатора).

Коефіцієнт стабілізації може бути визначений за результатами безпосередніх вимірювань напруг. У цьому випадку можна скористатися формулою (3.1).

В компенсаційних стабілізаторах напруги відбувається порівняння фактичної величини вихідної напруги з його заданою величиною. Залежно від величини і знаку різниці між ними автоматично здійснюється відповідний вплив на елементи стабілізатора, який спрямований на зменшення цієї різниці. Компенсаційний стабілізатор напруги є системою автоматичного регулювання.

Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів послідовного і паралельного типів наведені відповідно на рисунках 3.3 і 3.4.

Основними елементами компенсаційних стабілізаторів є:

- джерело опорної (зразкової) напруги, 1;
- порівнювальний і підсилювальний елемент, 2;
- регулювальний елемент (транзистор), 3.

В стабілізаторах послідовного типу регулювальний елемент 3 вмикається між випрямлячем і навантаженням та виконує роль баластного опору. Порівнювальний і підсилювальний елемент 2 будується таким чином, щоб при зростанні напруги на виході стабілізатора (наприклад, через збільшення вхідної

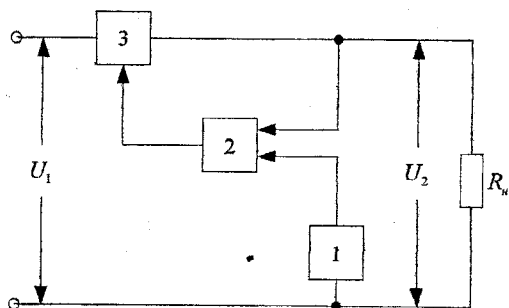


Рисунок 3.3 – Структурна схема компенсаційного стабілізатора послідовного типу

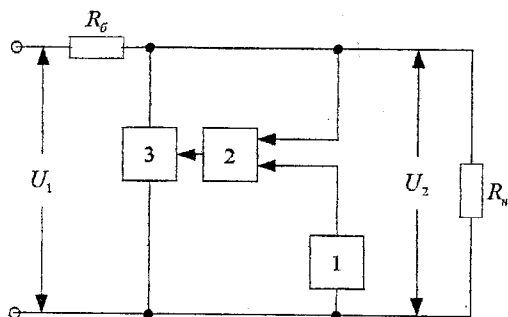


Рисунок 3.4 – Структурна схема компенсаційного стабілізатора паралельного типу

напруги або зменшення струму через навантаження) вихідний сигнал підсилювача 2 закривав регулювальний елемент 3. У цьому випадку внутрішній опір регулювального елемента 3 зростає, падіння напруги на ньому збільшується, а вихідна напруга стабілізатора залишається практично незмінною. При зменшенні вихідної напруги реакція стабілізатора буде зворотною.

В стабілізаторах паралельного типу регулювальний елемент вмикається паралельно навантаженню, а послідовно з ними – постійний

баластний резистор  $R_6$ . Схема порівнювального і підсилювального елемента 2 будується таким чином, щоб при зростанні напруги на виході стабілізатора вихідний сигнал підсилювача 2 збільшував струм через регулювальний елемент 3. За рахунок збільшення струму регулювального елемента 3 збільшується падіння напруги на баластному опорі  $R_6$ , а напруга на навантаженні майже не змінюється.

В стабілізаторах послідовного типу на регулювальному елементі падає напруга, яка складає величину  $(U_1 - U_2)$ , а через регулювальний елемент проходить струм, який дещо перевищує струм у навантаженні.

В стабілізаторах паралельного типу до регулювального елемента прикладена напруга, яка дорівнює вихідній, а струм, що тече через нього, при незмінній напрузі  $U_1$  знаходиться у зворотній залежності від струму навантаження.

На рисунку 3.5 наведена принципова схема послідовного транзисторного стабілізатора з підсилювачем у колі зворотного зв'язку, який характеризується порівняно високим коефіцієнтом стабілізації. В такій схемі транзистор  $VT2$  є порівнювальним і підсилювальним елементом, а транзистор  $VT1$  виконує функцію елемента регулювання.

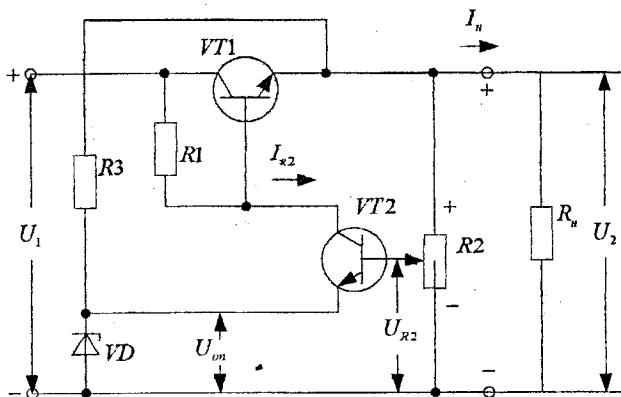


Рисунок 3.5 – Схема транзисторного стабілізатора послідовного типу

Напруга база-емітер транзистора  $VT2$  дорівнює різниці напруг: опорної  $U_{on}$  і частини вихідної, яка порівнюється з опорною, -  $U_{R2}$ . Якщо напруга на навантаженні зростає, то збільшується напруга  $U_{R2}$ , яка, як видно зі схеми, прикладена у прямому напрямку до емітерного переходу транзистора  $VT2$ . Наслідком цього є збільшення емітерного та колекторного струмів транзистора  $VT2$ . Через збільшення колекторного струму цього транзистора збільшується падіння напруги на резисторі  $R_1$ , внаслідок чого потенціал колектора транзистора  $VT2$  зменшується. При

цьому зменшується напруга на емітерному переході транзистора  $VT1$ . Емітерний і колекторний струми цього транзистора зменшуються, що спричиняє відновлення номінальної напруги на навантаженні. Аналогічні процеси відбуваються при зменшенні напруги на навантаженні.

Коефіцієнт стабілізації наведеної на рисунку 3.5 схеми стабілізатора визначається за формулою:

$$K_{CT} = \gamma \cdot K_{VT2} \frac{U_2}{U_1}, \quad (3.6)$$

де  $K_{VT2}$  – коефіцієнт підсилення підсилювача постійного струму на транзисторі  $VT2$ ;  $\gamma = \frac{U_{R2}}{U_2}$  – коефіцієнт навантаження.

Вихідний опір стабілізатора (з урахуванням внутрішнього опору джерела вхідної напруги  $R_{дж}$ ) визначається за формулою:

$$R_{вих} = \frac{R_{дж} + r_E}{\gamma \cdot K_{VT2}}, \quad (3.7)$$

де  $r_E$  – вхідний опір транзистора  $VT1$  для схеми його ввімкнення зі спільною базою (СБ).

Із співвідношень (3.6) та (3.7) видно, що коефіцієнт стабілізації схеми збільшується, а вихідний опір зменшується, якщо коефіцієнт підсилення підсилювача  $K_{VT2}$  збільшується.

Величину  $K_{VT2}$  наближено можна знайти за формулою:

$$K_{VT2} \approx \beta_2 \frac{R_1}{R_{вх2}}, \quad (3.8)$$

де  $\beta_2$  – коефіцієнт підсилення струму транзистора  $VT2$ ;  $R_{вх2}$  – вхідний опір транзистора  $VT2$  (для схеми із спільним емітером – СЕ).

Таким чином, для поліпшення роботи стабілізатора необхідно вибрати транзистор підсилювального каскаду з високим коефіцієнтом підсилення  $\beta$ , а в коло колектора цього транзистора вмикати високоомний резистор  $R_1$ .

### 3.2 Приклади розв'язання задач

**Приклад 1.** Визначити опір баластного резистора в параметричному стабілізаторі, якщо напруга стабілізації дорівнює 10 В, а напруга на вході дорівнює 20 В. Вхідний струм стабілізатора становить 20 мА.

#### Розв'язання

Для визначення опору баластного резистора можна скористатися формулою (3.4). При цьому слід врахувати, що умовою задачі задана величина вхідного струму, який є сумою струму стабілітрона та струму навантаження:

$$I_{ex} = I_{cm.0} + I_H.$$

Отже:

$$R_b = \frac{U_1 - U_H}{I_{cm.0} + I_H} = \frac{20 - 10}{20 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом.}$$

### 3.3 Задачі

3.3.1. Визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги, якщо при зміні вхідної напруги від 1 до 3 В напруга на навантаженні змінилася від 1 до 1,5 В.

Відповідь:  $K_{CT} = 2,5$ .

3.3.2. Як зміниться струм стабілітрона параметричного стабілізатора, якщо вхідна напруга змінилася на величину  $\Delta U_{ex} = 2 \text{ В}$ ? Опір баластного резистора дорівнює 200 Ом. Вважати, що вихідна напруга залишилась незмінною.

Відповідь:  $\Delta I_{cm} = 10 \text{ mA}$ .

3.3.3. Як зміниться струм стабілітрона і вхідний струм у параметричному стабілізаторі, якщо опір резистора навантаження збільшити у два рази? Вважати, що напруга на навантаженні не змінилась.

Відповідь:  $I_{cm.2} = I_{cm.1} + \frac{I_{H1}}{2}$ .

3.3.4. Яким повинен бути опір баластного резистора в параметричному стабілізаторі, щоб у режимі холостого ходу стабілітрон не вийшов з ладу? Максимальний струм стабілітрона в режимі стабілізації  $I_{cm.max} = 100 \text{ mA}$ , а напруга стабілізації становить 10 В. Величина вхідної напруги 20 В.

Відповідь:  $R_b \geq 100 \text{ Ом}$ .

3.3.5. В параметричному стабілізаторі вхідна напруга і напруга на навантаженні спочатку дорівнювали відповідно 20 і 10 В. Визначити коефіцієнт стабілізації, якщо при збільшенні вхідної напруги напруга на резисторі навантаження змінилась на 1 В, а вхідний струм стабілізатора – на 0,1 А. Опір баластного резистора дорівнює 200 Ом.

Відповідь:  $K_{CT} \approx 7$ .

3.3.6. Чому дорівнює відносна зміна напруги на виході параметричного стабілізатора, якщо напруга стабілізації становить 8 В, струм стабілітрона змінюється на  $\Delta I_{cm} = 1 \text{ mA}$ , а диференціальний опір стабілітрона  $R_b = 16 \text{ Ом}$ ?

Відповідь:  $\frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}} = 0,002$ .

3.3.7. Визначити, в яких межах буде змінюватися напруга на виході стабілізатора, якщо відомо, що  $\frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}} = 0,1$ , напруга стабілізації становить 10 В, а коефіцієнт стабілізації дорівнює 25.

Відповідь:  $\Delta U_{ex} = 0,04 \text{ В}$ .

3.3.8. Визначити опір баластного резистора в параметричному стабілізаторі напруги, якщо відомо, що напруга на навантаженні дорівнює 10 В, вхідна напруга – 16 В, максимальний і мінімальний струми стабілітрона відповідно дорівнюють  $I_{ст.макс} = 25 \text{ мА}$ ,  $I_{ст.мін} = 5 \text{ мА}$ , струм у навантаженні 10 мА.

Відповідь:  $R_B = 240 \text{ Ом}$ .

3.3.9. Визначити зміну струму стабілітрона, якщо напруга стабілізації дорівнює 9 В, а опір навантаження зменшився з 1,2 кОм до 900 Ом.

Відповідь:  $\Delta I_{ст} = 2,5 \text{ мА}$ .

3.3.10. Користуючись структурними схемами компенсаційних стабілізаторів послідовного і паралельного типу, наведеними на рисунках 3.3 та 3.4, проаналізуйте їх роботу у випадку короткого замикання і холостого ходу навантаження. Поясніть, який з цих режимів є небезпечним для регулюючих транзисторів в обох схемах стабілізаторів.

3.3.11. З яких міркувань вибирають параметри баластного резистора для схеми стабілізатора паралельного типу? На яку величину колекторного струму повинен бути розрахований регулюючий транзистор для схеми стабілізатора послідовного типу? В яких випадках застосовують у якості регулюючих складені транзистори?

3.3.12. Проаналізуйте аналітичний вираз для коефіцієнта стабілізації стабілізатора послідовного типу (3.6) і дайте формальне та фізичне пояснення залежності цього коефіцієнта від величини частки вихідної напруги, яка подається на порівнювальний та підсилювальний елемент. Як змінюється коефіцієнт стабілізації, якщо ця частка збільшується?

### 3.4 Лабораторна робота №3

#### “Дослідження напівпровідникових стабілізаторів постійної напруги”

**Мета роботи** – дослідити властивості та характеристики параметричного та компенсаційного стабілізаторів напруги.

#### Опис лабораторного стенда

Для виконання даної лабораторної роботи використовується три стенди: “Блок вентилів”, “Блок опорів” та “Стабілізатори напруги постійного струму”.

“Блок вентилів” використовується для створення мостового трифазного випрямляча, вихідна випрямлена напруга якого, як відомо, є найбільшою серед усіх випрямлячів, які досліджувалися в попередній роботі. Блок “Стабілізатори напруги постійного струму”, рисунок 3.6, крім власне параметричного та компенсаційного стабілізаторів, містить схему регулювання величини вхідної напруги стабілізаторів, за допомогою якої імітується несталість цієї напруги. Зміни напруги на входах стабілізаторів реалізуються змінним резистором  $R2$ , який приєднаний до бази складеного транзистора  $VT1$ .

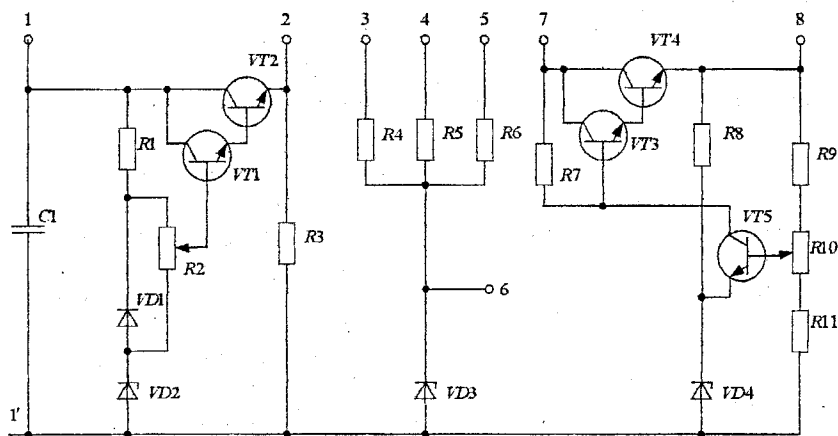


Рисунок 3.6 – Схема лабораторного стенда

Для створення і подачі випрямленої напруги на схему регулювання блока “Стабілізатори напруги постійного струму” необхідно скласти схему випрямляча згідно з рисунком 2.17, від’єднати активне навантаження цього випрямляча і замість нього приєднати даний блок, з’єднавши відповідно гніздо “9” випрямляча з гніздом “1” блока, а гніздо “10” випрямляча – з гніздом “1” блока.

Навантаження стабілізаторів вибираються з блока опорів згідно з порядком виконання роботи.

### Порядок виконання роботи

1.1. Скласти схему трифазного мостового випрямляча (див. рисунок 2.17) і приєднати гнізда “9” та “10” блока вентилів відповідно до гнізд “1” та “1” стабілізаторів напруги постійного струму (схеми регулювання). Подати на випрямляч трифазну напругу з трифазного лабораторного генератора, обмотки якого попередньо з’єднати зіркою.

1.2. З'єднати послідовно резистори  $R_1$  і  $R_2$  блоку опорів та використати їх у якості навантаження параметричного стабілізатора. Для цього гнізда "1" та "2" блока опорів слід об'єднати, а гнізда "1" та "2" приєднати відповідно до гнізд "6" і "1" стабілізатора.

1.3. Приєднати до схеми регулювання параметричний стабілізатор напруги, для чого безпосередньо на блоці "Стабілізатори напруги постійного струму" з'єднати гнізда "2" і "3". При цьому баластним резистором параметричного стабілізатора буде резистор  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ .

1.4. За допомогою змінного резистора  $R_2$  схеми регулювання змінювати величину постійної напруги на вході параметричного стабілізатора від максимальної до мінімальної величини та зняти залежність напруги на навантаженні від вхідної напруги стабілізатора. Вхідна напруга  $U_I$  вимірюється в гнізді "2" блока "Стабілізатори напруги постійного струму", а напруга на навантаженні  $U_H$  – в гнізді "6" цього блока. Результати вимірювань занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати досліджень параметричного стабілізатора для  $R_6 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_H = 200 \text{ Ом}$

$U_I, \text{В}$									
$U_H, \text{В}$									

1.5. Залишивши без зміни навантаження параметричного стабілізатора, встановити опір баластного резистора  $R_6 = 50 \text{ Ом}$ , для чого з'єднати паралельно резистори  $R_4$  і  $R_5$  (у блоці "Стабілізатори напруги постійного струму" об'єднати гнізда "3" і "4"). Зняти залежність напруги на навантаженні від вхідної напруги стабілізатора (аналогічно попередньому пункту). Результати вимірювань занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати досліджень параметричного стабілізатора для  $R_6 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_H = 200 \text{ Ом}$

$U_I, \text{В}$									
$U_H, \text{В}$									

1.6. Залишивши без зміни навантаження параметричного стабілізатора, встановити опір баластного резистора  $R_6 = 33,3 \text{ Ом}$ , для чого з'єднати паралельно резистори  $R_4$ ,  $R_5$  і  $R_6$  (у блоці "Стабілізатори напруги постійного струму" об'єднати гнізда "3", "4" і "5"). Зняти залежність напруги на навантаженні від вхідної напруги стабілізатора (аналогічно попередньому пункту). Результати вимірювань занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати досліджень параметричного стабілізатора для  $R_6 = 33,3 \text{ Ом}$ ,  $R_H = 200 \text{ Ом}$

$U_I, \text{В}$									
$U_H, \text{В}$									

1.7. Для складеної у попередньому пункті схеми ( $R_0=33,3 \text{ Ом}$ ,  $R_H=200 \text{ Ом}$ ) виконати наступні вимірювання. Встановити максимальну напругу на вході параметричного стабілізатора  $U_{I\max}$ , виміряти її значення. Виміряти при цьому також величину напруги на навантаженні  $U_{H\max}$  (ці дані можна взяти також з таблиці 3.3). Залишивши вольтметр приєднаним до навантаження, зменшувати вхідну напругу стабілізатора до такої величини, щоб напруга на навантаженні зменшилася відносно  $U_{H\max}$  на 0,2 В. Зафіксувати цю напругу на навантаженні ( $U_{H\min}$ ) та виміряти при цьому величину вхідної напруги  $U_{I\min}$ . Такі ж вимірювання виконати для опорів навантаження 100, 25 і 15 Ом. Всі навантаження містяться в лабораторному стенді "Блок опорів". Результати вимірювань занести до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати досліджень параметричного стабілізатора при різних опорах навантаження і  $R_0 = 33,3 \text{ Ом}$

$U, \text{ В}$	$R_{H1} = 200 \text{ Ом}$	$R_{H2} = 100 \text{ Ом}$	$R_{H3} = 25 \text{ Ом}$	$R_{H4} = 15 \text{ Ом}$
$U_{I\max}$				
$U_{H\max}$				
$U_{I\min}$				
$U_{H\min}$				

1.8. З метою дослідження компенсаційного стабілізатора напруги з'єднайте в лабораторному стенді "Стабілізатори напруги постійного струму" гнізда "2" і "7", подавши таким чином на вхід компенсаційного стабілізатора напругу зі схеми регулювання (схема регулювання

Таблиця 3.5 – Результати досліджень компенсаційного стабілізатора при різних опорах навантаження

		$R_{H1} = 200 \text{ Ом}$							
$U_1, \text{ В}$									
$U_2, \text{ В}$									
		$R_{H2} = 100 \text{ Ом}$							
$U_1, \text{ В}$									
$U_2, \text{ В}$									
		$R_{H3} = 25 \text{ Ом}$							
$U_1, \text{ В}$									
$U_2, \text{ В}$									
		$R_{H4} = 15 \text{ Ом}$							
$U_1, \text{ В}$									
$U_2, \text{ В}$									

залишається приєднаною до виходу трифазного мостового випрямляча). Встановити максимальне значення напруги на виході схеми регулювання

(гніздо "2") і за допомогою змінного резистора  $R/0$  встановити зручну для розрахунків та вимірювання величину вихідної стабілізованої напруги (ціле число вольт) (гніздо "8").

1.9. Почергово під'єднуючи в якості навантаження до вихідних гнізд стабілізатора "8" і "1" опори 200, 100, 25 і 15  $\Omega$ , зняти залежності вихідної стабілізованої напруги  $U_2$  від вхідної  $U_1$ . Результати вимірювань занести до таблиці 3.5.

### Обробка результатів

2.1. За даними таблиць 3.1 – 3.3 побудувати графічні залежності напруги на навантаженні  $U_H$  від вхідної напруги  $U_I$ . Розгашувати всі графіки на одному рисунку (для зручності їх порівняльного аналізу) та визначити *область змін* вхідної напруги, в межах якої має місце прийнятна стабілізація, тобто лінія побудованої графічної залежності є практично прямою, паралельною горизонтальній осі. Зробити висновки.

2.2. В межах визначених *областей змін* вхідної напруги (див. пункт 2.1) з використанням даних таблиць 3.1 – 3.3 розрахувати для кожного значення вхідної напруги  $U_I$  величини струмів стабілітрона. Розрахунки виконати за формулою:

$$I_{ст} = \frac{U_I - U_H}{R_б} - \frac{U_H}{R_H}, \quad (3.9)$$

де  $R_H = 200 \Omega$ , а  $R_б$  приймає значення, які наведені в назвах таблиць.

За даними проведених розрахунків побудувати графіки залежностей струму стабілітрона від величини вхідної напруги  $U_I$  для трьох значень баластного опору. Зробити висновки, знати фізичне пояснення характеру отриманих залежностей.

2.3. За формулою (3.9) розрахувати величини струмів стабілітрона, користуючись даними таблиці 3.4. При цьому використати тільки напруги  $U_{Imax}$  та відповідні їм значення  $U_{Hmax}$  і чотири значення опорів навантаження  $R_H$ , величини яких вказані у таблиці 3.4. Побудувати графік залежності струму стабілітрона від опору навантаження, зробити висновки, знати фізичне пояснення характеру отриманої залежності.

2.4. За даними таблиці 3.4 та з використанням формули (3.1) розрахувати коефіцієнти стабілізації параметричного стабілізатора для наведених у таблиці значень опорів навантаження. При цьому врахувати, що:

$$\begin{aligned} \Delta U_{ex} &= U_{I_{max}} - U_{I_{min}}; \\ \Delta U_{ex} &= U_{H_{max}} - U_{H_{min}}; \\ U_{ex} &= \frac{U_{I_{max}} + U_{I_{min}}}{2}; \\ U_{ex} &= \frac{U_{H_{max}} + U_{H_{min}}}{2}. \end{aligned}$$

2.5. За даними таблиці 3.5 побудувати графічні залежності напруги на навантаженні  $U_2$  від вхідної напруги  $U_1$ . Розташувати всі графіки на одному рисунку (для зручності їх порівняльного аналізу) та визначити *область змін* вхідної напруги, в межах якої має місце прийнятна стабілізація, тобто лінія побудованої графічної залежності є практично прямою, паралельною горизонтальній осі. Зробити висновки.

2.6. В межах визначених *областей змін* вхідної напруги (див. пункт 2.5) з використанням побудованих графіків розрахувати коефіцієнти стабілізації компенсаційного стабілізатора для різних опорів навантаження. Для розрахунку скористатись формулою (3.1).

### *Контрольні запитання*

1. Дати означення і фізичний зміст основних параметрів стабілізаторів напруги.

2. Пояснити механізм стабілізації напруги на навантаженні параметричного стабілізатора в умовах зміни вхідної напруги при незмінному струмові навантаження.

3. Пояснити механізм стабілізації напруги на навантаженні параметричного стабілізатора в умовах зміни опору навантаження при незмінній вхідній напрузі.

4. Що таке мінімальний і максимальний струми стабілізації стабілітрона?

5. Дати фізичне пояснення впливу опору баластного резистора на коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора.

6. З яких міркувань визначається мінімальний опір навантаження при заданих змінах вхідної напруги параметричного стабілізатора?

7. Які переваги має схема двокаскадного параметричного стабілізатора у порівнянні з однокаскадним? Навести схему двокаскадного параметричного стабілізатора і пояснити його роботу.

8. Пояснити принцип роботи компенсаційного стабілізатора послідовного типу.

9. Пояснити принцип роботи компенсаційного стабілізатора паралельного типу.

10. Проаналізувати умови роботи регулюючих елементів стабілізаторів послідовного і паралельного типів при короткому замиканні навантаження.

11. Проаналізувати умови роботи регулюючих елементів стабілізаторів послідовного і паралельного типів в режимі холостого ходу.

## Література

1. Электропитание устройств связи / Под ред. В.Е.Китаева. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Китаев В.Е. и др. Расчет источников электропитания устройств связи. – М.: Связь, 1979.
3. Источники вторичного электропитания / Под ред. Ю.И.Конева. – М.: Радио и связь, 1990.
4. Электропитание устройств связи (учебное пособие) / Под ред. Ю.Д.Козляева. – М.: Радио и связь, 1998.
5. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г., Масленников В.В. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1991.
6. Сборник задач с решениями по общей электротехнике / Под ред. В.К.Пономаренко. – М.: Высшая школа, 1992.
7. Мурзін В.К. Загальна електротехніка. – К.: Вища школа, 2002.

*Навчальне видання*

Святослав Тадіонович Барась  
Микола Антонович Філінюк  
Сергій Миколайович Павлов

# **Електроживлення**

## **(лабораторний практикум)**

Оригінал-макет підготовлено Барасем С.Т.

Редактор В.О. Дружиніна  
Коректор З.В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 22.03.05р.  
Формат 29,7x42 1/4  
Друк різнографічний  
Тираж 75 прим.  
Зам. № 2005-044

Гарнітура Times New Roman  
Папір офсетний  
Ум. друк. арк. 3.12

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95