



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Навчально-науковий інститут автоматичної, кібернетики та
обчислювальної техніки
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-206

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Електрозабезпечення»
(частина 1)

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
денної та заочної форми навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННІАКОТ
Протокол № 2 від 04.11.2019 р.

Рівне – 2019



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електрозабезпечення» (частина 1) для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання [Електронне видання] / Франчук О. М., Тарас Б. І. – Рівне: НУВГП, 2019. – 39 с.

Укладачі: Б. І. Тарас, старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій; Франчук О. М., к.т.н., доцент.

Відповідальний за випуск – Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Керівник групи забезпечення спеціальності Древецький В. В.

© Б. І. Тарас,
О. М. Франчук, 2019
© НУВГП, 2019



ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	4
1. Підбір кабеля для живлення однофазних споживачів електричної енергії.....	5
2. Підбір випрямних діодів у схемах випрямлення змінної напруги	9
3. Дослідження трифазних некерованих випрямлячів змінного струму	13
4. Дослідження помножувача випрямленої напруги.....	21
5. Підбір і розрахунок елементів пасивних згладжуючих фільтрів	31
Література.....	39





Вступ

Грунтовне і осмислене засвоєння теоретичного курсу «Електрозабезпечення» неможливе без надбання практичних навичок шляхом виконання дослідів в лабораторних умовах.

Виконання запропонованих лабораторних робіт охоплює основні розділи курсу: хімічні джерела електричної енергії, перетворення напруги змінного струму в напругу постійного струму, регулювання напруг постійного і змінного струмів, стабілізатори напруги і струму, хімічні джерела струму.

Кожна з робіт включає в себе тему, мету, короткі теоретичні відомості, а також порядок виконання роботи. Виконавши експеримент (або отримавши вихідні дані), студент заносить дані у відповідні таблиці. Далі, вдома **самостійно**, студент виконує обчислення необхідних величин, будує графічні залежності, зображує осцилограми електричних сигналів. Результатом цієї роботи є звіт з лабораторної роботи.

Обчислення виконуються за допомогою інженерного калькулятора або спеціалізованих прикладних програм (наприклад, Microsoft Excel, Matlab, MatCAD). Побудова графічних залежностей та графіків може здійснюватися на міліметровому папері у обраному масштабі або за допомогою цих же прикладних програм. Зображення осцилограм подається або у вигляді фотокопій з екрану осцилографа, або перерисовуються на міліметровому папері. При цьому **обов'язково** необхідно зазначити в якому масштабі була знята осцилограма (як по напрузі, В/поділку; так і по часу мс/поділку).

Готовий звіт подається викладачу на папері або надсилається на корпоративну електронну пошту викладача. Надсилання звіту з лабораторної роботи допускається **лише з корпоративної пошти студента**. При цьому в темі листа обов'язково зазначається номер лабораторної роботи та навчальна дисципліна. В тіло листа прикріплюється файл зі звітом у форматі: *.doc, *.docx або *.pdf.

Успішне, виконання запропонованих лабораторних робіт сформує у студента інженерні навички у подальшій професійній діяльності, а також закріпить теоретичні знання з курсу «Електрозабезпечення».



Лабораторна робота 1.

«Підбір кабеля для живлення однофазних споживачів електричної енергії»

1. Мета роботи

Навчитися підбирати кабель для електроживлення однофазних споживачів від трифазної мережі при заданих характеристиках споживачів, їх кількості, а також віддаленості від розподільчого щита.

2. Теоретичні відомості.

Основними вимогами до вибору проводів, кабелів є, перше, щоб вони не нагрівались максимальним тривалим робочим струмом більше установлених норм; по-друге, втрати напруги ($\Delta U, \%$) не повинні перевищувати допустимих значень. Щоб не допустити перевантаження однієї з фаз до кожної фази під'єднують споживачі приблизно однакової потужності.

Для однофазних споживачів, що працюють з постійною споживаною потужністю максимальний тривалий робочий струм визначають за формулою:

$$I_{м.р} = k \cdot I_n,$$

$$I_n = \frac{10^3 \cdot P}{\sqrt{3}U_n}$$

де I_n - номінальний струм для трифазних приймачів.

Коефіцієнт $k = 1,1 \div 1,2$ враховує нерівномірність навантаження фаз однофазними приймачами.

Площу поперечного перерізу струмопровідної жили проводу чи кабеля вибирають за умови, щоб його тривала допустима сила струму $I_{дон}$ була не менше максимального тривалого струму $I_{м.р}$, тобто $I_{дон} \geq I_{м.р}$. Тривало-допустимі сили струму для проводів з полівінілхлоридною ізоляцією, алюмінієвими і мідними жилами при схованому способі прокладання наведені в табл. 1



Таблиця 1

Площі поперечного перерізу струм. жил, мм ²	Сила струму, А			
	Мідна жила		Алюмінієва жила	
	Чотири одножилнь.	Один трижилнь.	Чотири одножилнь.	Один трижилнь.
1,0	14	14	-	-
1,2	15	14,5	-	-
1,5	16	15	-	-
2,0	20	19	15	14
2,5	25	21	19	16
3,0	26	24	21	18
4,0	30	27	23	21
5,0	34	31	27	24
6,0	40	34	30	26

Для прокладання під штукатуркою рекомендуються марки проводів, наведених в табл.2

Таблиця 2

Марка провода	Кількість жил	Матеріал жил	Площа попереч. перерізу, мм ²	Ізоляції жил	Оболонка
АПВ	1	алюміній	2,0...120	полівініл хлорид	-
ПВ1	1	мідь	0,5...95	-/-	-
АППВ	2,3	алюміній	2,0...6,0	-/-	полівініл- хлоридн. пластикат
ППВ	2,3	мідь	0,75...4,0	-/-	-/-
ВРГ	1,2,3,4	мідь	1...24	гумова	-/-

Після вибору поперечного перерізу струмопровідної жили і марки проводу здійснюють перевірку на втрату напруги, яка не повинна перевищувати 2,5%, за формулою

$$\Delta U, \% = \frac{10^5 P \cdot l}{U_n^2} (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi)$$



де r і x – активний і індуктивний опори проводів на одиницю довжини, Ом/км; P - потужність електроприймачів, кВт; l - довжина електропроводки, м; $\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності споживача електроенергії.

При відсутності даних опір розраховують за формулою

$$r = \frac{l}{\gamma \cdot S},$$

де l - довжина провода, м; γ - електропровідність жили, м/Ом · мм²; S - площа поперечного перерізу жили, мм². Для мідних жил $\gamma_{\text{м}} = 53$ м/Ом · мм², для алюмінієвих $\gamma_{\text{а}} = 32$ м/Ом · мм².

Якщо довжина електропроводки незначна, то індуктивним опором можна знехтувати. Тоді

$$\Delta U \% = \frac{P \cdot l}{U_{\text{н}}^2 \cdot \gamma \cdot S} \cdot 10^5$$

Якщо $\Delta U > 5\%$, то необхідно вибрати провід з більшим поперечним перерізом.

3. Програма роботи

1. Зобразити схему підключення однофазних споживачів до трифазної мережі.

2. За заданою кількістю споживачів, їх потужністю, коефіцієнтом потужності, визначити струм навантаження в одній фазі.

3. Здійснити попередній вибір кабеля, вказавши при цьому його марку, кількість жил, переріз однієї жили, тип ізоляції. Додати у звіт зовнішній вигляд обраного кабеля.

4. Виконати перевірку кабеля на втрати напруги за відомою довжиною кабелю, номінальною напругою, питомим опором та перерізом.

5. У разі втрат напруги $>5\%$, обрати кабель більшого перерізу та повторити розрахунок.

4. Контрольні питання.

1. Які втрати мають місце в провідниках при передачі електричної енергії на відстань і чим вони обумовлені?



2. Чому і як впливає коефіцієнт потужності на втрати в лініях живлення електроприймачів?
3. За яких умов вибирають площу поперечного перерізу струмопровідної жили?
4. Яке значення втрат напруги є допустимим?
5. Чому рівна потужність трифазної мережі?
6. Що необхідно зробити, якщо розрахункові втрати напруги перевищують допустимі?
7. На які властивості кабеля впливає матеріал ізоляції?
8. Як залежить тривало допустимий струм кабеля від його перерізу?
9. Як залежать втрати напруги в кабелі від його питомого опору?
10. Яка необхідна мінімальна кількість жил в кабелі для підключення трифазного симетричного споживача?
11. Яка необхідна мінімальна кількість жил в кабелі для підключення однофазних (несиметричних) споживачів до трифазної мережі?
12. Яку роль виконує заземлення? У якому випадку його доцільно підводити від розподільчого щита?
13. Для яких споживачів необхідно враховувати коефіцієнт нерівномірності навантаження фаз?
14. Який матеріал струмопровідної жили використовують для прокладання електричних мереж всередині житлових приміщень?
15. У яких випадках допускається використання кабелів з алюмінієвими струмопровідними жилами?
16. Що означає перша літера «А» у маркуванні кабеля (проводу)?
17. Які матеріали використовують в якості ізоляторів в кабелях та проводах?



Лабораторна робота 2.

«Підбір випрямних діодів у схемах випрямлення змінної напруги»

1. Мета роботи

Навчитися підбирати випрямні діоди з відомих параметрів навантаження та схеми випрямлення.

2. Теоретичні відомості.

Для вибору випрямного діода необхідно визначити струм навантаження і зворотну напругу. Струм визначають за формулою $I_n = P_n / U_n$. Величина зворотної напруги залежить від величини напруги на вторинній обмотці трансформатора U_2 і схеми випрямлення (табл. 1).

Таблиця 1

Схема випрямлення (рис.1)	а	б	в	г	д
Зворотна напруга $U_{зв}$	$\sqrt{2} \cdot U_2$	$2\sqrt{2} \cdot U_2$	$\sqrt{2} \cdot U_2$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2$

Для визначення U_2 користуються співвідношенням між діючим значенням U_2 і середнім значенням випрямленої напруги U_d , наведеним в табл. 2.

Таблиця 2

Схема випрямлення (рис.1)	а	б	в	г	д
U_d / U_2	0,45	0,9	0,9	1,17	2,34

Величину U_d визначають із рівності $U_d = U_n + U_{VD} + U_T$, де $U_{VD} = I_n \cdot R_{VD}$, а $R_{VD} = U_{np} / I_{np.max}$, $U_T = I_n \cdot R_T$ - спад напруги на опорі вторинної обмотки трансформатора. Величину R_T орієнтовно приймають $(0,1 \dots 0,05) R_n$. Після визначення I_n і $U_{зв}$ з (Додаток 1)



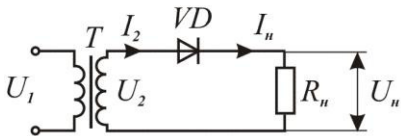
вибирають тип діода за умовою, що $I_{VD} < I_{np,max}$ і $U_{зв} \geq U_{зв,max}$.

При виборі діода врахувати, що для схеми випрямлення рис.1,а струм через діод $I_{VD} = I_n$, для схем рис.1,в,г $I_{VD} = I_n/2$, для схем рис.1,г,д $I_{VD} = I_n/3$.

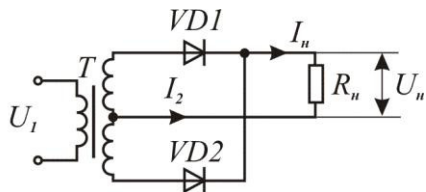
3. Програма роботи.

Для заданої схеми випрямлення (рис.1) і вихідних даних (таблиця 4) вибрати випрямні діоди, визначити величини напруги вторинної обмотки трансформатора U_2 , струму навантаження I_n , коефіцієнта пульсації $k_{n,ex}$ і частоти пульсації f_n . Для вибраних діодів вказати:

- тип діода;
- максимальний допустимий (середній) прямий струм $I_{np,max}$, A;
- максимально допустиму зворотну напругу $U_{зв,max}$ B;
- постійну (середню) пряму напругу U_{np} , B;



а)



б)

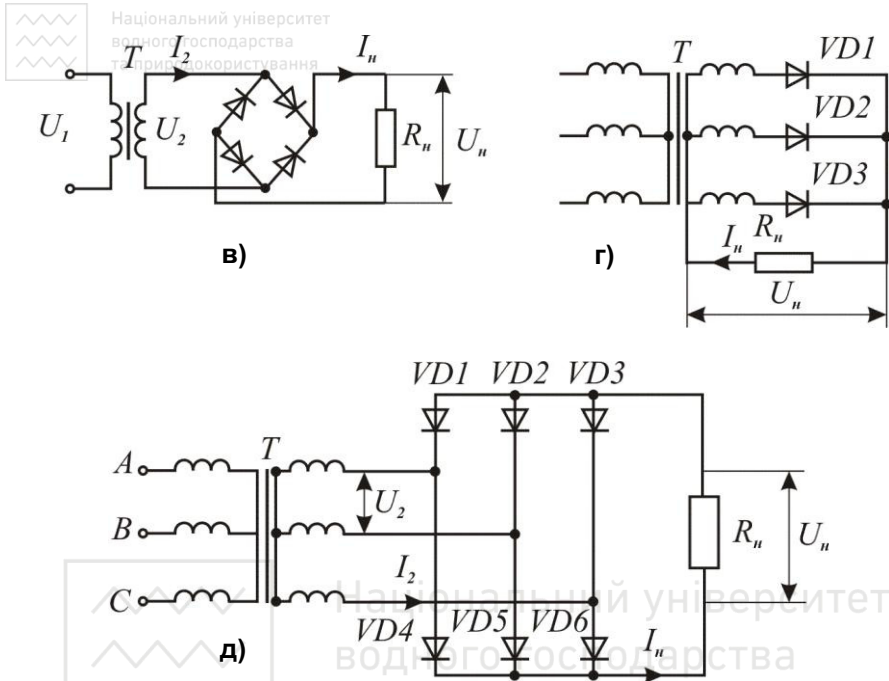


Рис.1. Схеми випрямлення напруги змінного струму: а - однофазна однопівперіодна; б – однофазна двопівперіодна з нульовим виводом; в – однофазна двопівперіодна мостова; г- трифазна однопівперіодна з нульовим виводом; д – трифазна двопівперіодна мостова.

Таблиця 4

Варіант схеми випрямлення на рис. 1		Варіант даних		
№ варіанту	Схема	Передостання цифра залікової книжки	U , В	P_n , Вт
0	а	1	24	25
1	б	2	36	10
2	в	3	60	30
3	г	4	12	60
4	д	5	24	70

5	а	6	100	15
6	б	7	40	20
7	в	8	85	45
8	г	9	36	50
9	д	0	42	90

4. Контрольні питання.

1. Що таке середнє значення випрямленої напруги?
2. Що називається коефіцієнтом пульсацій?
3. Який недолік однопівперіодних схем випрямлення?
4. За якої умови використовують однопівперіодну схему випрямлення?
5. Який недолік двофазної схеми випрямлення напруги однофазного змінного струму?
6. Що собою являє діодна збірка?
7. Чим обумовлений спад напруги на опорі вторинної обмотки трансформатора?
8. В яких випадках у випрямних діодах використовують охолоджуючі радіатори?
9. Яка схема випрямлення має найбільший коефіцієнт пульсацій?
10. Яка схема випрямлення має найменший коефіцієнт пульсацій?



«Дослідження трифазних некерованих випрямлячів змінного струму»

1. Мета роботи

Скласти та дослідити одно- та двопіриодні схеми випрямлення трифазної напруги.

2. Теоретичні відомості.

Для промислового генерування електричної енергії, на електростанціях використовують трифазні синхронні генератори. Такі ж генератори використовуються в джерелах аварійного живлення з приводом від двигунів внутрішнього згорання – дизель-генераторах.

EPC у проводах обмотки статора генератора залежить від кривої розподілу магнітної індукції в зазорі, між статором і ротором, що визначається формою полюса. Форма полюса, як правило, робиться такою, щоб форма *EPC* наближалась до синусоїди. Тому розглядаючи процес випрямлення, можна оперувати напругами фаз як синусоїдальним функціями часу:

$$U_A = U_m \sin \omega \cdot t ;$$

$$U_B = U_m \sin \left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$U_c = U_m \sin \left(\omega \cdot t + \frac{2}{3} \pi \right),$$

де U_m - максимальне значення фазної напруги;

$$\omega = 2\pi f = \frac{\pi n}{30} - \text{кутова частота обертання.}$$

Найбільш поширені трифазні випрямлячі за схемою Міткевича В. Ф. (на трьох діодах, запропонована ним у 1901 р.) і за схемою Ларіонова А. Н. (на шести діодах, запропонована в 1923 р.)

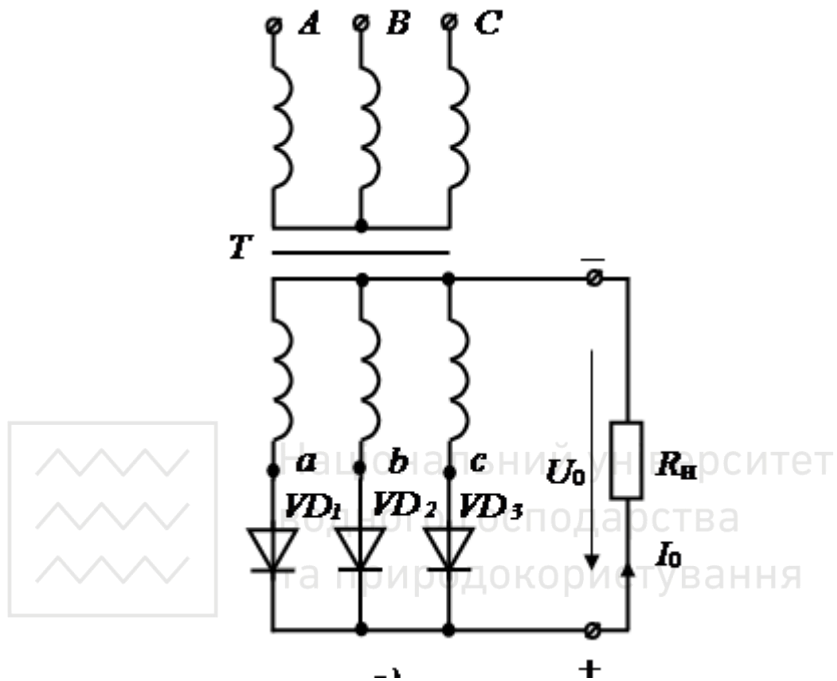


Рис.1. Трифазний однопівперіодний випрямляч змінної напруги.

Трифазна схема випрямлення з нульовим виводом (рис.1) містить трифазний трансформатор TV1, три діоди VD1, VD2, VD3 та навантаження R_H . Вторинна обмотка трансформатора обов'язково з'єднується зіркою. Розглянемо роботу схеми. На рис. 2 зображена трифазна схема напруг вторинних обмоток трансформатора. У момент t_1 , коли U_A позитивна, а U_B та U_C негативні, струм буде протікати тільки через вторинну обмотку і діод VD1. Миттєве значення цього струму:

$$i_{d1} = i_A = U_A / R_H$$

Внаслідок протікання струму потенціал катода VD1 буде рівний потенціалові його анода, тобто U_A . Оскільки катоди діодів усіх фаз об'єднані, то потенціали катодів VD2 та VD3 теж будуть рівні U_A . Тому, поки напруга фаз B і C менша напруги U_A , діоди



VD2 та VD3 не будуть проводити струм. У момент t_2 діод VD2 починає проводити струм, напрям якого в навантаженні збігається з напрямом струму в попередню третину періоду. До VD1 виявляється прикладеною негативна напруга ($U_A < U_B$) і він закривається. Так само, у момент t_3 провідним стає діод VD3, а VD2 закривається. Завжди працює той діод, анод якого знаходиться під найбільшим позитивним потенціалом. Діод працює $1/3$ періоду. Тому струм діоду $I_d = I_0 / 3$. Максимальна величина зворотної напруги на діоді дорівнює амплітуді лінійної напруги:

$$U_{VDmax} = U_{lmax} = \sqrt{3} E_{2\phi max} = 2.1 U_0$$

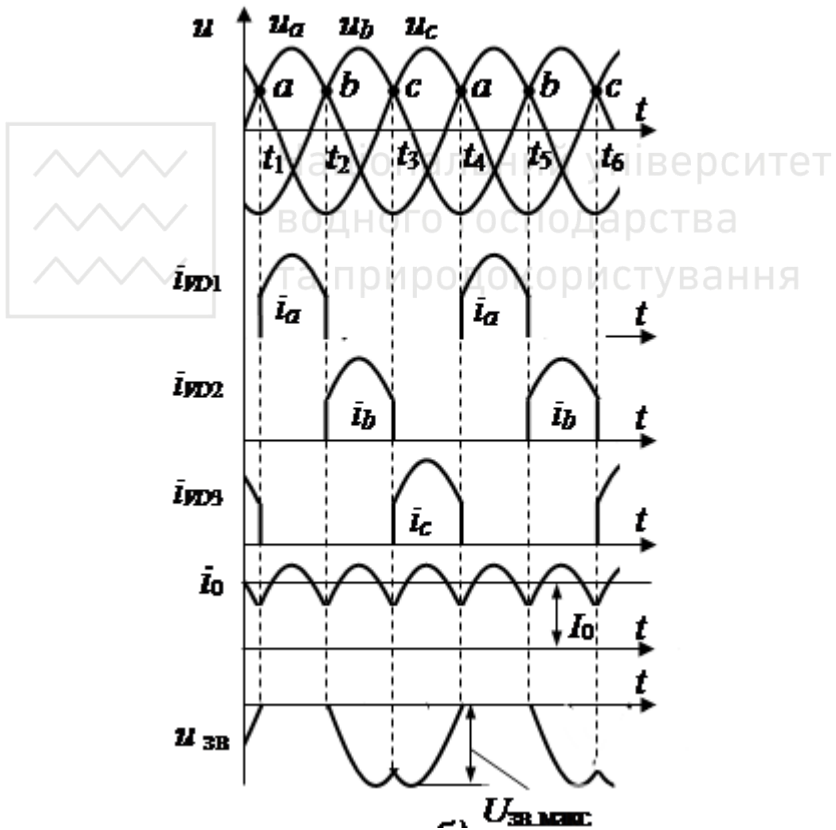


Рис.2. Графік зміни струмів і напруг щодо часу



Двопівперіодний трифазний випрямляч за схемою Ларіонова.

Змінний струм генератора перетворюється на постійний з допомогою випрямляча, який має шість діодів (рис.3), що створюють трифазну місткову схему. Перша група – це діоди $VD1$, $VD3$ і $VD5$, катоди яких з'єднані між собою, створюють позитивний полюс випрямленої напруги, друга група – це діоди $VD2$, $VD4$ і $VD6$, аноди яких з'єднані між собою, створюють негативний полюс випрямленої напруги.

У кожний момент часу працюють два діоди – по одному з кожної групи. В першій групі струм проводить той діод, анод якого перебуває під найбільшим потенціалом; а у другій групі струм проводить діод, катод якого перебуває під найменшим потенціалом.

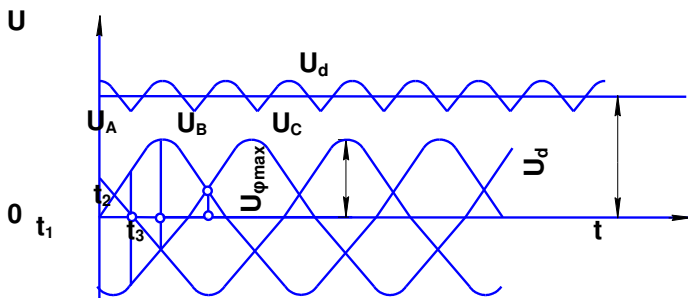
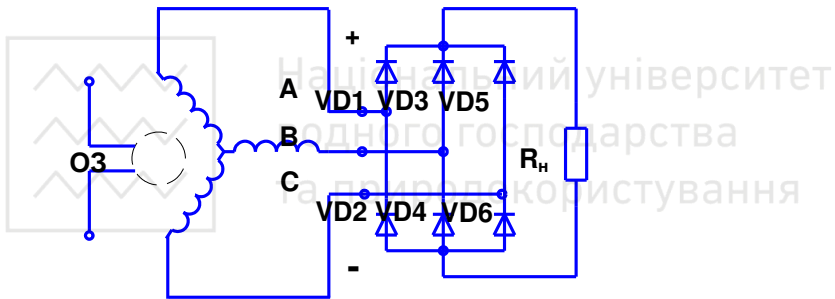


Рис.3. Трифазний двопівперіодний випрямляч змінної напруги: схема випрямляча та графік зміни напруги щодо часу



Наприклад, в інтервалі часу $t_1 \dots t_2$ струм протікає від фази A до фази B через діод $VD1$, що має найбільший потенціал аноду в першій групі, навантаження R_H та діод $VD4$, який має найменший потенціал у другій групі. В момент t_2 замість діода $VD4$ починає працювати діод $VD6$, а діод $VD1$ проводить струм ще одну шосту періоду до моменту t_3 , потім на заміну діода $VD1$ приступає до роботи діод $VD3$. Отже, кожний діод пропускає струм протягом однієї третини періоду. Трифазна мостова схема випрямлення струму забезпечує відносно невеликі пульсації випрямлення напруги. Так, випрямлена напруга визначається координатами між верхніми та нижніми дугами фазних напруг U_A, U_B і U_C (рис.1.1, б). Тому випрямлена напруга U_d пульсуюча і частота пульсації в 6 разів більша, ніж частота змінної напруги, тобто

$$f_n = 6f = \llcorner 60 \gg 60 = 0,1 \rho n.$$

Максимальне значення випрямленої напруги становить $1,73 U_m$, а мінімальне – $1,5 U_m$. Пульсація випрямленої напруги

$$\Delta U_d = \llcorner 73 - 1,5 \gg U_m = 0,23 U_m.$$

Середнє значення випрямленої напруги з періодом пульсації $T/6$ можна визначити за формулою

$$U_d = \frac{6}{T} \int_{-T/12}^{T/6} \sqrt{3} U_m \cos \omega t dt = 1,65 U_\phi = 1,35 U_m'$$

Пульсацію випрямленої напруги можна виразити через середнє значення випрямленої напруги:

$$\Delta U_d = \llcorner 23 U_d \gg 1,65 = 0,139 U_d.$$



Наприклад, при середньому значенні випрямленої напруги $14В$ пульсація становить $1,95В$. При цьому максимальне значення досягає $14,65В$, а мінімальне – $12,7В$.

З підключенням до генератора активного навантаження протікає струм

$$I_d = U_d / R_H$$

Отже, форма випрямленого струму має такий самий вигляд, як і випрямлена напруга, тобто випрямлений струм пульсуватиме з амплітудною пульсацією

$$I_{dm} = U_{dm} / R_H$$

Середнє значення випрямленого струму

$$I_d = \frac{6}{T} \int_{-T/12}^{T/12} I_{dm} \cos \omega t dt = \left(I_{dm} \right) \pi = 0,955 I_{dm}$$

3. Програма роботи.

1. Скласти однопівперіодну трифазну схему випрямлення, зображену на рис.1.

2. Встановити фазні напруги на блоці трифазних напруг U_{ϕ} , рівними $12 В$.

3. Дослідити роботу схеми при від'єднаному навантаженні (в режимі холостого ходу), вимірявши діюче значення випрямленої напруги U_d , змінну складову випрямленої напруги U_{zm} та обчислити коефіцієнт пульсацій Kn .

4. Результати досліджень записати в таблицю 1.

Таблиця 1. Результати досліджень однопівперіодної схеми

Режим роботи	Холостий хід	Робочий режим	Без одного діода
U_{ϕ} , В			
U_d , В			
U_{zm} , В			
Kn			



5. Під'єднати осцилограф до однієї з фаз на джерелі трифазних напруг та зарисувати (або сфотографувати) отриману осцилограму.

6. Під'єднати осцилограф паралельно до навантаження та зарисувати (або сфотографувати) отриману осцилограму.

7. Дослідити роботу схеми при під'єднаному навантаженні (в робочому режимі), виконавши п.3-6.

8. Від'єднати один з трьох діодів та дослідити роботу схеми, виконавши п.3-6.

9. Обчислити коефіцієнти пульсацій у різних режимах.

10. Скласти двопівперіодну трифазну схему випрямлення, зображену на рис.3.

11. Встановити фазні напруги на блоці трифазних напруг U_{ϕ} , рівними 12 В.

12. Дослідити роботу схеми при від'єднаному навантаженні (в режимі холостого ходу), вимірявши діюче значення випрямленої напруги U_d , змінну складову випрямленої напруги U_{zm} та обчислити коефіцієнт пульсацій K_p .

13. Результати досліджень записати в таблицю 2.

Таблиця 2. Результати досліджень двопівперіодної схеми

Режим роботи	Холостий хід	Робочий режим	Без одного діода	Без двох діодів
$U_{\phi}, \text{В}$				
$U_d, \text{В}$				
$U_{zm}, \text{В}$				
K_p				

14. Під'єднати осцилограф до однієї з фаз на джерелі трифазних напруг та зарисувати (або сфотографувати) отриману осцилограму.

15. Під'єднати осцилограф паралельно до навантаження та зарисувати (або сфотографувати) отриману осцилограму.

16. Дослідити роботу схеми при під'єднаному навантаженні (в робочому режимі), виконавши п.3-6.

17. Від'єднати один з шести діодів та дослідити роботу схеми, виконавши п.3-6.

18. Від'єднати два з шести діодів та дослідити роботу схеми, виконавши п.3-6.



19. Обчислити коефіцієнти пульсацій у різних режимах.

4. Контрольні питання.

1. Яка схема випрямлення має найбільший коефіцієнт пульсацій?
2. Яка схема випрямлення має найменший коефіцієнт пульсацій?
3. Який вигляд має осцилограма напруги на навантаженні для трифазної однопівперіодної схеми?
4. Як вона зміниться при виході з ладу одного з діодів?
5. Який вигляд має осцилограма напруги на навантаженні для трифазної двопівперіодної схеми?
6. Як вона зміниться при виході з ладу одного з діодів?
7. Як вона зміниться при виході з ладу двох діодів?
8. Чому частота пульсацій на виході однопівперіодної схеми у три рази більша, ніж частота фазної напруги?
9. Чому частота пульсацій на виході двопівперіодної схеми у шість разів більша, ніж частота фазної напруги?
10. Скільки діодів одночасно пропускають струм у однопівперіодній схемі випрямлення?
11. Скільки діодів одночасно пропускають струм у двопівперіодній схемі випрямлення?



1. Мета роботи

Вивчити принцип роботи помножувача випрямленої напруги і дослідити вплив величини ємності конденсатора на зовнішню характеристику і коефіцієнт пульсації.

2. Теоретичні відомості.

Для живлення електронної апаратури виробничого і побутового призначення потужністю до 500Вт використовують однофазні випрямлячі з двопівперіодною схемою випрямлення (рис.1,а), оскільки вона має малий вхідний опір і низьку зворотню напруга $U_{зв}$, прикладену до випрямного діода

$$U_{зв} = U_{2m} = \frac{\pi}{2} U_d$$

де U_{2m} - амплітудне значення вхідної напруги,

U_d - її середнє значення.

Ця схема не потребує складного згладжувального фільтра.

Для схеми на рис. 1,а $U_d = 0,9U_2$, де $U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}$.

Щоб одержати $U_d \approx U_{2m}$, паралельно навантаженню R_H приєднують електролітичний конденсатор C , рис.1,б)

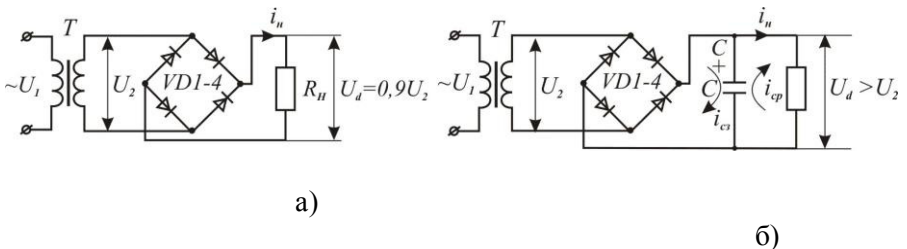


Рис.1



Переважає більшість споживачів, яким потрібна напруга живлення постійного струму до 1000 В є малопотужними, наприклад, кінескопи, лазери. Тому для таких споживачів краще використовувати помножувачі випрямленої напруги. Помножувачем випрямленої напруги називається випрямляючий пристрій, в якому за допомогою діодно-ємнісних ланок формується постійна напруга $U_d = n \cdot U_{2m}$, де $n \geq 2$ - коефіцієнт множення.

Основним елементом помножувача напруги є діодно-ємнісна ланка, яка виконує функцію накопичення електричної

енергії $W_c = \frac{CU^2}{2}$. Принцип множення напруг розглянемо на схемах подвоєння. Схеми подвоєння випрямленої напруги поділяють на паралельну (симетричну) (рис.3,а) і послідовну (несиметричну) (рис.3,б).

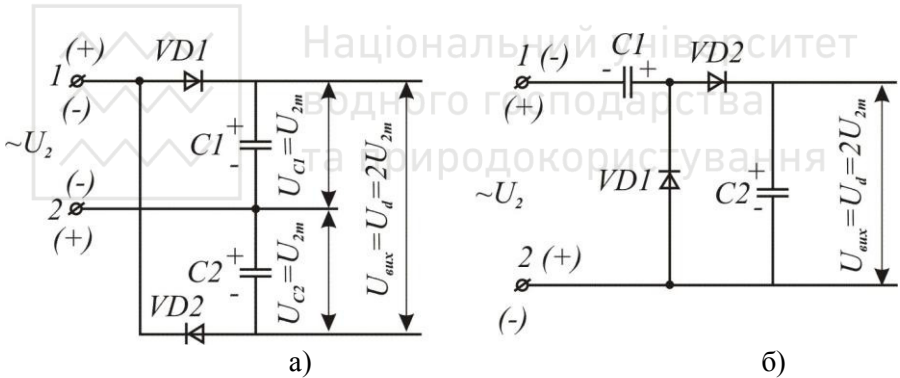


Рис.3

Принцип дії паралельного подвоювача напруги, (рис.3,а) такий. Нехай перший півперіод напруги U_2 буде додатнім, тобто потенціал точки 1 буде (+) а точки 2 (-). Ця напруга зарядить конденсатор $C1$ через діод $VD1$ до амплітудного значення $U_{C1} = U_{2m}$. В другу половину півперіода полярності точок 1 і 2 поміняються на протилежні і конденсатор $C2$ зарядиться через діод $VD2$ теж до $U_{C2} = U_{2m}$. При вказаних полярностях обкладинок конденсаторів і їх послідовному з'єднанні одержимо вихідну

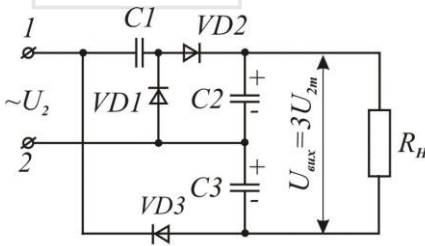


випрямлену напругу $U_d = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{2m}$ за умови відсутності

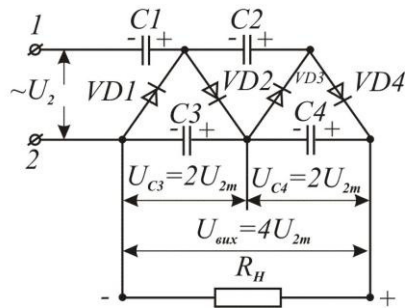
навантаження. В дійсності $U_d < 2U_{2m}$, що зумовлено спадом напруги на опорах діодів $VD1$ і $VD2$ при зарядці конденсаторів. Основним недоліком схеми є значний коефіцієнт пульсації.

Послідовна схема подвоювача напруги має кращі показники і на її основі побудовані помножувачі напруги. В послідовній схемі (рис. 3,б) при додатній полярності напруги U_2 в точці 2 конденсатор $C1$ через діод $VD1$ зарядиться до $U_{C1} = U_{2m}$. При зміні полярності на протилежну до конденсатора $C2$ буде прикладена сума напруг $U_{C1} + U_{2m}$, тому $U_d = U_{C2} = 2U_{2m}$.

Послідовна схема дає можливість одержати в режимі холостого ходу випрямлену напругу $U_d = n \cdot U_{2m}$, де множник n є цілим числом. На (рис. 4,а) наведена схема множення напруги на $n = 3$ ($U_d = 3U_{2m}$), яка складається з подвоювача напруги на $C1$, $VD1$, $C2$, $VD2$ і послідовно включеного однопівперіодного випрямляча на $C3$, $VD3$.



а)



б)

Рис.4

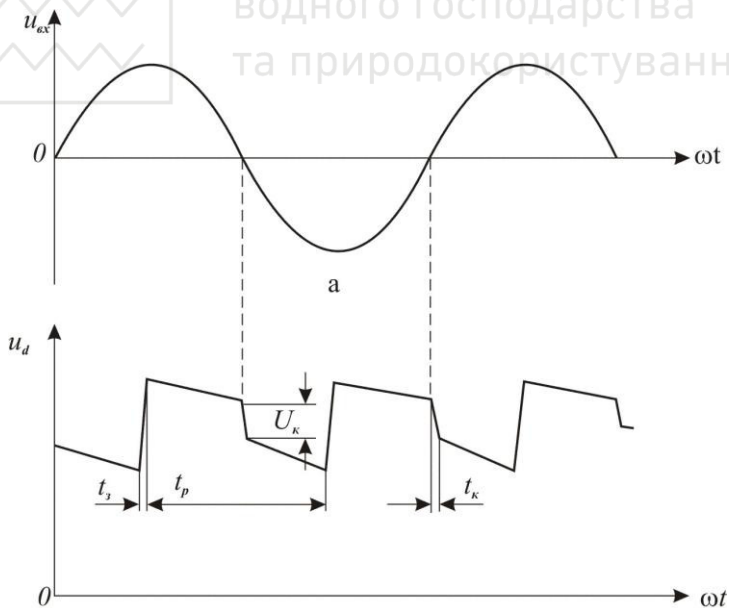
На (рис. 4,б) наведена схема випрямляча з множенням напруги на $n = 4$, яка складається з послідовно з'єднаних двох подвоювачів напруги, тому $U_d = U_{C3} + U_{C4} = 4U_{2m}$.



З (рис. 4,а і б) видно, що за допомогою схем множення можна одержати потрібне значення вихідної випрямленої напруги, користуючись малогабаритними, низьковольтними і дешевими елементами електронної техніки – випрямними діодами і конденсаторами.

Помножувачам напруги властиві суттєві недоліки, а саме: мала потужність; низький к.к.д., залежність коефіцієнта пульсації від струму навантаження.

Основним джерелом струму навантаження є струми розряду конденсаторів через опір R_H . Заряд конденсаторів здійснюється через малий опір R_3 , який складається з прямого опору діодів і опору вторинної обмотки трансформатора (якщо він є). Отже стала часу заряду $T_3 = R_3 \cdot C$ значно менша сталої часу розряду $T_p = R_H \cdot C$, оскільки $R_3 \ll R_H$. Це впливає на величину і форму пульсацій, (рис.4,б).



б

Рис.5.



На рис.5 наведені хвильові діаграми змінної (а) і

випрямленої (б) напруг, t_z і t_p - тривалість заряду і розряду конденсаторів, t_k - час комутації.

Із збільшенням кількості послідовно з'єднаних діодно-ємнісних ланок зменшується стала часу розряду через послідовне з'єднання конденсаторів і, як наслідок, збільшується коефіцієнт пульсації. Різке зменшення напруг на величину U_k , (рис.5,б) при зміні полярності вхідної напруги U_2 обумовлено розрядженням заряджених конденсаторів через випрямні діоди на протязі часу комутації t_k , тобто переходу їх з відкритого стану у закритий. Час комутації t_k – це проміжок часу, коли при зміні полярності вхідної напруги діоди не встигають закритися, в наслідок чого відбувається короткочасне коротке замикання конденсаторів через ці діоди.

Особливістю помножувача напруги є значна залежність спаду зовнішньої характеристики $U_{вих} I$ від величини ємності конденсаторів, оскільки енергія заряджених конденсаторів, з яких знімається вихідна напруга, рівна сумі енергій цих конденсаторів,

$$W_c = \frac{n \cdot C \cdot U_{2m}^2}{2}$$

тобто за умови, що всі ємності конденсаторів однієї величини, де n - кількість послідовно з'єднаних конденсаторів.

Для споживачів напругою 300...1000 В, струмами до 200 мА і потужністю до 50 Вт використання помножувачів випрямленої напруги доцільне.

3. Програма роботи

1. Вивчити принцип роботи схем множення випрямленої напруги.

2. Дослідити зворотні напруги на випрямних діодах помножувача напруги.

3. Дослідити полярності і величини напруг заряду конденсаторів схеми.

4. Дослідити зовнішню характеристику помножувача напруги.



5. Дослідити часові діаграми вихідної напруги.

3.1. Опис лабораторного стенда.

Загальний вигляд лабораторної установки наведений на рис.6.а, принципова електрична схема на рис.6.б.

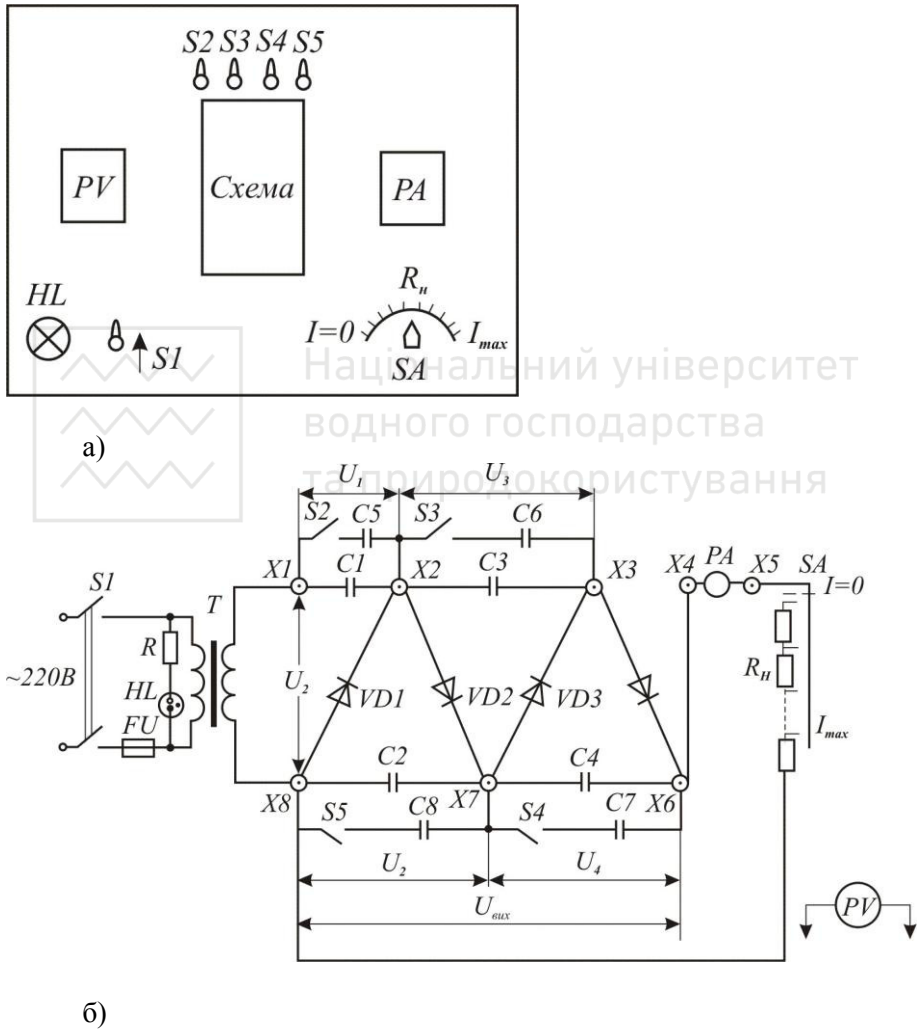


Рис.6



На схемі $S1$ - вимикач напруги живлення; $S2, S3, S4, S5$ - вимикачі додаткових ємностей; PV, PA мультиметри для вимірювання напруги і струму навантаження; R_n - опір навантаження; $C1, C2, C3, C4$ - конденсатори ємністю по 8мкФ ; $C5, C6, C7, C8$ - конденсатори ємністю по 100мкФ ; SA - перемикач опорів навантаження.

3.2. Порядок виконання роботи.

1. Ознайомитися з лабораторною установкою. Переконатися, що вимикачі $S1, S2, S3, S4, S5$ вимкнуті і перемикач SA знаходиться в положенні $I = 0$. Встановити вимірювальні прилади на передню панель установки і при'єднати до схеми міліамперметр. Встановити необхідні межі вимірювання напруг.

2. Вимикачем $S1$ відкрити живлення лабораторної установки (засвітиться індикаторна лампа $HL1$). Виміряти змінну напругу U_2 і напруги на конденсаторах $C1, C2, C3, C4$. Дані вимірювань записати в табл. 1.

Таблиця 1

U_2, B	U_{C1}, B	U_{C2}, B	U_{C3}, B	U_{C4}, B	$U_{C1} + U_{C3}, B$	$U_{C2} + U_{C4}, B$
n						

За даними таблиці 1 вирахувати коефіцієнт множення випрямленої напруги n за формулою $n = \frac{U_{Ci}}{\sqrt{2} \cdot U_2}$, де U_{Ci} - напруга на i -му конденсаторі помножувача напруги.

3. Виміряти зворотні напруги на діодах схеми і занести їх в табл. 2.

Таблиця 2

Діоди	$VD1$	$VD2$	$VD3$	$VD4$
U_{36}, B				

4. Дослідити зовнішню характеристику випрямляча без



додаткових ємностей ($C_{\delta} = 0$) і дані записати в табл. 3.

$$C_{\delta} = 0$$

Таблиця 3

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
I, mA								
U_d, B								

Увімкнути $S2, S3, S4, S5$ і знову дослідити зовнішню характеристику. Дані вимірювань записати в табл. 4.

$$C_{\delta} = 100 \mu F$$

Таблиця 4

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
I, mA								
U_d, B								

За даними таблиць 3 і 4 побудувати зовнішні характеристики U I в одних координатах.

5. Дослідити вплив величини навантаження і ємності конденсаторів на коефіцієнт пульсації p . Для цього при $I_n = 0$ і без C_{δ} мультиметром виміряти випрямлену напругу U_{δ} , осцилографом виміряти амплітуду пульсації U_{mp} і дані записати в таблицю 5. Осцилограму пульсації зарисувати. Дослід повторити з підключення C_{δ} .

Перемикачем SA встановити максимальну величину струму I_{max} і повторити попередній дослід. Дані записати в таблицю 5.



Таблиця 5

Параметри	$I_n = 0$		$I_n = I_{\max}$	
	$C_\delta = 0$	$C_\delta = 100\text{мкФ}$	$C_\delta = 0$	$C_\delta = 100\text{мкФ}$
U_d, B				
U_{mp}, B				
p				

Коефіцієнт пульсації розрахувати за формулою $p = \frac{U_{mp}}{U_d}$.

Зробіть висновок про вплив величин навантаження і ємності на коефіцієнт пульсації.

4. Контрольні питання.

1. Які існують засоби отримання підвищеної випрямленої напруги і їх недоліки?
2. Навіщо після схеми випрямлення під'єднують конденсатори великої ємності?
3. Як поділяють схеми подвоєння випрямленої напруги.
4. Чому вихідна напруга менша амплітудної?
5. Який недолік симетричної схеми подвоєння напруги?
6. На основі якої схеми побудовані помножувачі напруги?
7. Які переваги і недоліки помножувачів напруги?
8. Що є джерелом струму навантаження?
9. Чому стала часу заряду менша сталої часу розряду конденсаторів?
10. Що таке час комутації?



«Підбір і розрахунок елементів пасивних згладжуючих фільтрів»

1. Мета роботи

За заданими параметрами вхідної напруги та навантаження підібрати пасивний згладжуючий фільтр, щоб досягнути заданого коефіцієнту пульсацій вихідної напруги.

2. Теоретичні відомості.

Випрямлена напруга випрямляча з активним навантаженням є пульсуючою і описується рядом Фур'є

$$u = U_d + \sum_{k=1}^n U_k \cdot \cos \omega k t ,$$

де U_d – постійна складова, $\sum_{k=1}^n U_k \cdot \cos \omega k t$ – змінні складові випрямленої напруги, з яких найбільшу амплітуду має змінна самої низької частоти, тобто частота пульсації $f_n \equiv m \cdot f_i$, де m – кількість фаз випрямлення, f_i – частота мережі. Найбільший коефіцієнт пульсації K_n буде на частоті першої гармоніки.

$$K_n = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} \text{ або } K_n, \% = \frac{2}{m^2 - 1} \cdot 100$$

Для нормальної роботи електронних пристроїв і інших споживачів енергії постійного струму допустимі коефіцієнти пульсації від 0,1% до 0,001%. Досягнути таких коефіцієнтів пульсації можливо за допомогою згладжувальних фільтрів. Здатність згладжувального фільтра зменшувати K_n характеризується коефіцієнтом згладжування $K_{зг}$:

$$K_{зг} = \frac{K_n}{K_{нф}},$$

де K_n і $K_{нф}$ – коефіцієнти пульсації до і після згладжувального фільтра.

Від згладжувальних фільтрів вимагається:



- мінімальні втрати потужності і напруги;

- не вносити завади в роботу електронних пристроїв;

Сучасні згладжувальні фільтри поділяють на прості (L,C), складні (RC,LC) і транзисторні.

Принципи роботи ємнісного згладжувального фільтра (рис.1) наступний.

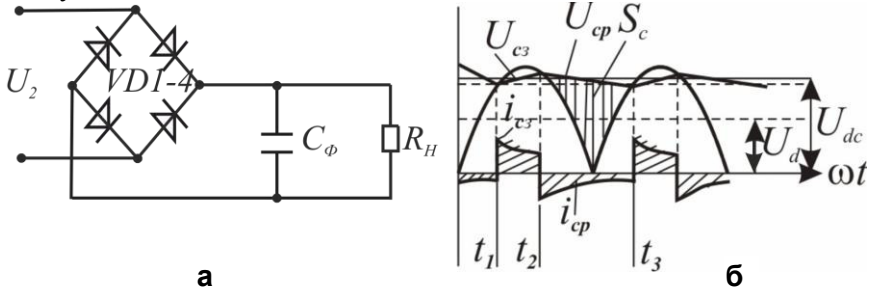


Рис.1. Схема випрямлення з активно-ємнісним навантаженням (а) і часові діаграми заряду і розряду конденсатора C_ϕ (б)

Приєднання конденсатора фільтра C_ϕ зменшує амплітуду пульсації, отже зменшує $K_n = U_{m1}/U_d$, тим більше, що одночасно збільшується середнє значення випрямленої напруги за рахунок енергії розряду конденсатора (площа S_c), тому $U_{dc} > U_d$, де U_{dc} і U_d – середні значення випрямленої напруги з C_ϕ і без.

На проміжку часу $t_1 - t_2$ конденсатор C_ϕ заряджається струмом $i_{сз}$ до напруги $U_{сз}$ і накопичує енергію, на проміжку $t_2 - t_3$ він розряджається на опір навантаження R_n (струм $i_{ср}$). Оскільки кількість накопиченої енергії конденсатором при заряджанні рівна витраченій енергії при розряджанні, то подвійна амплітуда першої гармоніки $U_{m1} = \frac{\square U_c}{2}$, звідки

$$K_n = \frac{U_{m1}}{U_{dc}} = \frac{\square U_c}{2U_d} = \frac{1}{2m \cdot f_m C_\phi \cdot R_n},$$

де m – кількість фаз випрямлення; f_m – частота струму мережі живлення; C_ϕ – ємність конденсатора фільтра; R_n – опір навантаження; U_{mc} – амплітуди коливання напруги на C_ϕ ; U_{dc} – середнє значення напруги при наявності конденсатора.



Доцільність ємнісного фільтра має місце при малих струмах навантаження ($I_n = U_{dc}/R_H$) або при великих ємностях C_ϕ . Ось чому в якості C_ϕ використовують електролітичні конденсатори.

Перевагою ємнісних фільтрів є їх простота. До недоліків слід віднести імпульсне перевантаження випрямних діодів струмом заряду і збільшення зворотної напруги до амплітудного значення U_2 .

Принципи дії індуктивного згладжувального фільтра (рис.2), ґрунтується на здатності індуктивності при протіканні через неї струму накопичувати електромагнітну енергію $W_{em} = LI^2/2$.

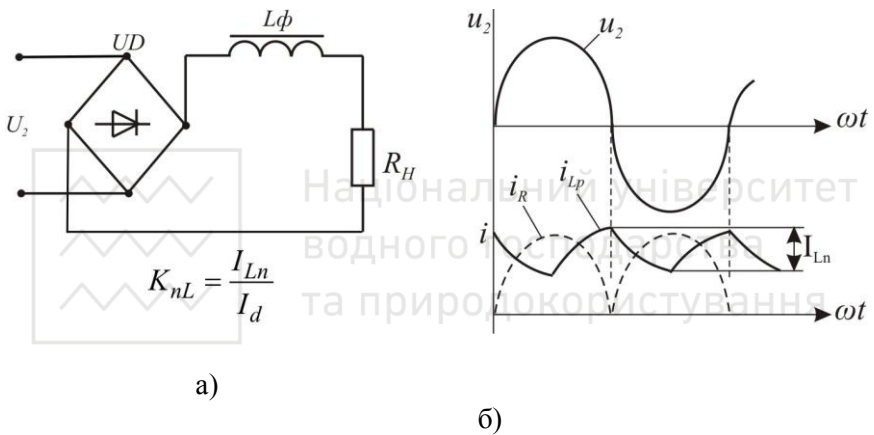


Рис.2. Схема вмикання (а) і хвильові діаграми (б) індуктивного згладжувального фільтра

За І законом комутації струм через індуктивність відстає від прикладної напруги на деякий кут φ (для реальної індуктивності), отже індуктивна складова струму розряду i_{Lp} буде затримувати зменшення струму через навантаження, тобто зменшувати пульсацію вихідної напруги, оскільки $U_{вих} = I_L \cdot R_H$. Коефіцієнт пульсації після L_ϕ буде

$$K_n = \frac{I_{nL}}{I_d} = K_{нсх} \frac{R_n + R_\phi}{\sqrt{(R_n + R_\phi)^2 + (m \cdot \omega_m \cdot L_\phi)^2}}$$



Знехтувавши $R_\phi \ll R_H$ отримаємо

$$K_{nL} = \frac{K_{nсх} \cdot R_H}{m \cdot \omega_M \cdot L_\phi},$$

де $K_{nсх}$ – коефіцієнт пульсації схеми випрямлення.

З виразу видно, що для зменшення коефіцієнта пульсації при використанні індуктивного фільтра бажано його використовувати для багатофазних схем випрямлення m , при малих опорах навантаження (R_H) і великих значеннях індуктивності фільтра (L_ϕ).

Основним недоліком індуктивних фільтрів є виникнення великої ЕРС самоіндукції при вимиканні навантаження, що вимагає додаткових заходів для захисту від перенапруг.

Кращі згладжувальні властивості мають складні Г-подібні LC і П-подібні CLC –фільтри, рис.3.

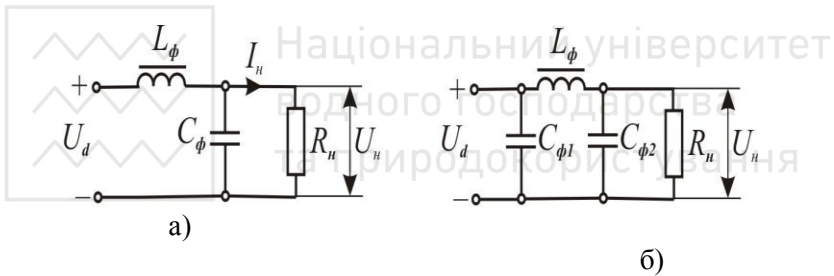


Рис.3. Схеми вмикання складних LC –фільтрів: а – Г-подібний; б – П-подібний

Для Г-подібного LC -фільтра коефіцієнт згладжування:

$$K_{зLC} = m^2 \omega^2 L_\phi C_\phi;$$

для П-подібних CLC –фільтрів:

$$K_{зCLC} = m^2 \omega^2 L_\phi C_\phi R_H.$$

Основними вимогами при виборі LC - і CLC –фільтри є відсутність резонансних явищ і впливу перехідних процесів на роботу випрямляча.

Основними недоліками наявних згладжувальних фільтрів є значні габарити, залежність коефіцієнта згладжування від струму навантаження, виникнення перехідних процесів і ін.



3. Програма роботи.

1. Для заданих коефіцієнта пульсації вихідної напруги $k_{n\text{вих}}$ (табл.1) і типу згладжувального фільтра (табл.2) визначити величину ємності конденсатора фільтра C_ϕ чи індуктивність L_ϕ фільтра для схеми випрямлення завдання 2.

Таблиця 1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$k_{n\text{вих}}$	0,0009	0,007	0,005	0,003	0,001	0,002	0,004	0,006	0,003	0,002

Таблиця 2

Передостання цифра залікової книжки	Тип фільтра	R_ϕ , Ом	L_ϕ , Гн	Формули розрахунку
0		1,0	-	$k_{3,RC} = m \cdot \omega C_\phi \cdot R_\phi$
9		-	-	$k_{3,C} = m \cdot \omega C_\phi \cdot R_n$
8		-	0,2	$k_{3,LC} = m^2 \cdot \omega^2 L_\phi \cdot C_\phi$



7		0,5	-	$k_{3,CRC} = m^2 \cdot \omega^2 \cdot C_\phi^2 \cdot R_\phi \cdot R_n$
6		-	0,1	$k_{3,CLC} = m^3 \cdot \omega^3 \cdot C_\phi^2 L_\phi R_n$
5		-	-	$k_{3,L} = \frac{m \cdot \omega L_\phi}{R_n}$
4		1,5	-	$k_{3,RC} = m \cdot \omega C_\phi \cdot R_\phi$
3		-	0,25	$k_{3,L} = m^2 \cdot \omega^2 L_\phi \cdot C_\phi$
2		-	-	$k_{3,C} = m \cdot \omega C_\phi \cdot R_n$
1		-	0,15	$k_{3,CLC} = m^3 \cdot \omega^3 \cdot C_\phi^2 L_\phi R_n$

В табл. 2 прийняті позначення:

m - кратність пульсацій випрямленої напруги, де $m = p \cdot z$ - кількість фаз випрямляча, p - кількість фаз напруги вторинної



водного господарства
та природокористування

обмотки трансформатора; $z = 1$ для однопівперіодної і $z = 2$ для двопівперіодної схем випрямлення; ω - кутова частота напруги, рад/с;

R_ϕ - опір фільтра, Ом;

C_ϕ - ємність фільтра, мкФ;

L_ϕ - індуктивність фільтра, Гн.

2. Для розрахунку величини ємності C_ϕ користуються формулами, наведеними в табл. 1, в яких $k_3 = \frac{k_{n.вх}}{k_{n.вих}}$, $k_{n.вх}$ і $k_{n.вих}$ - коефіцієнти пульсацій відповідно вхідної і вихідної напруг.

$k_{n.вх} = \frac{U_{m1}}{U_d}$, де U_{m1} - амплітуда першої гармоніки змінної складової, розкладеної в ряд Фур'є. $U_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t dt$ - середнє значення випрямленої напруги.

Величина $k_{n.вх}$, яка залежить від схеми випрямлення, наведена в табл.3.

Таблиця 3

Схема випрямлення	а	б	в	г	д
$k_{n.вх}$	1,57	0,67	0,67	0,23	0,057

В табл. 3 прийняті позначення схем випрямлення:

а – однопівперіодна однофазна;

б – двопівперіодна мостова однофазна;

в – двопівперіодна з середнім виводом;



г – однопівперіодна трифазна;

д – двопівперіодна трифазна.

4. Контрольні питання.

1. Яку функцію виконують згладжувальні фільтри?
2. Коли застосовуються ємнісні згладжувальні фільтри?
3. Коли застосовуються індуктивні згладжувальні фільтри?
4. Що називається коефіцієнтом пульсацій?
5. Від чого залежить вхідний коефіцієнт пульсацій?
6. Від чого залежить кратність вхідних пульсацій m ?
7. Що називається коефіцієнтом згладжування?
8. Чому в ємнісних згладжуючих фільтрах найчастіше використовуються електролітичні конденсатори.
9. Які недоліки ємнісних згладжуючих фільтрів?
10. Які недоліки індуктивних згладжуючих фільтрів?
11. Який вигляд має Г-подібна схема СL-фільтра?
12. Який вигляд має П-подібна схема СLC-фільтра?
13. Яка різниця між пасивними і активними згладжувальними фільтрами?



Література

1. Дмитрів В. Т., Шиманський В. М. Електроніка та мікросхемотехніка. Львів, 2007.
2. Коруд В. І., Гамола О.Є., Малинівський С.М. Електротехніка : підручник / За заг. ред. В. І. Коруда. 3-тє вид., переробл. і доп. Львів: "Магнолія плюс"; видавець СПД ФО В. М. Піча, 2005. 447 с.
3. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. Львів : Бескид Біт, 2003р. 640 с.
4. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка Підручник. К. : Каравела, 2018. 296 с. 2006.
5. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гомола О. Е. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. Львів, 2004.

