М.В. Захарченко, А. Ф. Кадацький, О.П. Русу,
І.П. Малявін, В.Б. Русаловський, О.А. Грабовий

ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 1 Теоретичні положення
Частина 2 Методичні вказівки

Одеса 2011

М.В. Захарченко, А. Ф. Кадацький, О.П. Русу,
І.П. Малявін, В.Б. Русаловський, О.А. Грабовий

ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 1 Теоретичні положення
Частина 2 Методичні вказівки

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як посібник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом 6.050903 «Телекомунікації»
(лист № 1/11 – 2644 від 04.04.2011 р.)

Одеса 2011

УДК 621.362.2
ББК 32.889

Затверджено Вченою радою
ОНАЗ ім. О.С. Попова.
Протокол № 4 від 25.11.2010 р.

Захарченко М.В. Електроживлення систем зв'язку. Лабораторний практикум: Частина 1 Теоретичні положення, Частина 2 Методичні вказівки /М.В. Захарченко, А.Ф. Кадацький, О.П. Русу, І.П. Малявін, В.Б. Русаловський, О.А. Грабовий. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 308 с.,іл.

У посібнику викладено матеріал для вивчення дисципліни «Електроживлення систем зв'язку», що розділений на залікові й змістовні модулі.

Приведені принципи побудови і функціонування пристроїв та систем електроживлення телекомунікаційних систем. Викладено методику розрахунку та дослідження випрямлячів, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів, імпульсних перетворювачів постійної напруги. Містить контрольні запитання й індивідуальні завдання різних рівнів складності, які сприяють придбанню навичок дослідження електричних процесів пристроїв і систем електроживлення засобів телекомунікацій.

Посібник призначений для самостійної роботи студентів, виконання УДРС, НДРС, курсового й дипломного проектування, він буде корисний для студентів при підготовці до лабораторних і практичних занять по дисципліні «Електроживлення систем зв'язку». Може бути корисний для інженерно-технічних працівників, що займаються дослідженням й проектуванням пристроїв і систем електроживлення.

Рецензенти:

В.М. Кошевий, д.т.н., проф., зав. кафедри морського радіозв'язку Одеської національної морської академії;

Н.О. Князєва, д.т.н., проф., зав кафедри інформаційних систем і мереж Одеської державної академії холоду;

А.Ф. Назаренко, д.т.н., проф., професор кафедри фізики Одеського національного політехнічного університету.

ISBN _____

М.В. Захарченко, А.Ф.Кадацький, О.П. Русу, І.П. Малявін, В.Б. Русаловський, О.А. Грабовий
Одеська національна академія зв'язку
ім. О.С. Попова.

ЗМІСТ

ЧАСТИНА 1 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ 6
ВСТУП 7
МОДУЛЬ 1 14
1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ВИПРЯМНІ ПРИСТРОЇ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ 14
1.1 До дослідження режимів роботи випрямного пристрою (однофазної мостової схеми випрямляння та згладжувальних фільтрів) 14
1.1.1 Випрямні пристрої. Загальні відомості 14
1.1.2 Вибір схеми випрямляння, типу фільтра та вентиля 15
1.1.3 Показники якості випрямлячів 18
1.2 До дослідження трифазних схем випрямлячів 19
1.2.1 Трифазні випрямлячі. Загальні відомості 19
1.2.2 Особливості функціонування трифазних випрямлячів 21
1.3 До дослідження однотактних керованих та некерованих випрямлячів 25
1.3.1 Однотактні керовані та некеровані випрямлячі. Загальні відомості 25
1.3.2 Робота однофазного однотактного випрямляча на активне навантаження 27
1.3.3 Робота однофазного однотактного випрямляча на активно-індуктивне навантаження 29
1.3.4 Підвищення ефективності керованих випрямлячів 30
1.3.5 Робота трифазного однотактного керованого випрямляча на активний характер навантаження 31
1.3.6 Особливості роботи трифазного однотактного керованого випрямляча на навантаження індуктивного характеру 34
МОДУЛЬ 2 36
2 ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ 36
2.1 До дослідження перетворювачів постійної напруги із самозбудженням 36
2.1.1 Інвертор із самозбудженням. Загальні відомості. Особливості схемотехнічної реалізації 36
2.1.2 Робота інвертора з осердям з лінійною петлею гістерезису 37
2.1.3 Робота інвертора з осердям з прямокутною петлею гістерезису 42
2.2 До дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів) 46
2.2.1 Імпульсний принцип перетворювання електричної енергії 46
2.2.2 Однотактні імпульсні перетворювачі знижувального, підвищувального та інвертувального типів 48
2.2.3 Особливості функціонування однотактних імпульсних перетворювачів 50
2.3 До дослідження півмостового перетворювача постійної напруги 53
2.3.1 Перетворювачі постійної напруги. Стислі відомості 53
2.3.2 Двотактний півмостовий перетворювач. Особливості побудови та функціонування 56
2.4 До дослідження тиристорного інвертора 59
2.4.1 Інвертори. Загальні відомості. Класифікація 59
2.4.2 Принципи побудови та функціонування інверторів 62
2.4.3 Тиристорний інвертор напруги 68
2.5 До дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги 70

2.5.1 Стабілізатори. Загальні відомості 70
2.5.2 Принципи функціонування компенсаційних стабілізаторів 72
2.5.3 Показники якості стабілізатора 75
2.6 До дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом 76
2.6.1 Завдання щодо перетворювання електричної енергії. Структурні схеми перетворювачів електричної енергії 76
2.6.2 Джерела вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом. Принципи побудови та функціонування 81
2.7 До дослідження пристроїв та систем електроживлення модульної структури (факультативна робота студентів – УДРС, НДРС) 90
2.7.1 Пристрої та системи модульної структури. Принципи побудови та функціонування 90
2.7.2 Особливості електричних процесів пристроїв та систем модульної структури 96
2.7.3 Показники якості фільтрувальних властивостей однофазної та багатофазної структур побудови перетворювачів 104
3 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ “ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ЗВ’ЯЗКУ” 108
ЧАСТИНА 2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ 138
ВСТУП 139
В.1 Опис віртуальної лабораторії 140
МОДУЛЬ 1 151
1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ВИПРЯМНІ ПРИСТРОЇ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ 151
Лабораторна робота № 1.1 Дослідження режимів роботи випрямного пристрою (однофазної мостової схеми випрямляння та згладжувальних фільтрів) 151
Лабораторна робота № 1.2 Дослідження трифазних схем випрямлячів 170
Лабораторна робота № 1.3 Дослідження однотактних керованих і некерованих випрямлячів 185
МОДУЛЬ 2 203
2 ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ 203
Лабораторна робота № 2.1 Дослідження перетворювача постійної напруги із самозбудженням 203
Лабораторна робота № 2.2 Дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів) 215
Лабораторна робота № 2.3 Дослідження півмостового перетворювача постійної напруги 231
Лабораторна робота № 2.4 Дослідження тиристорного інвертора 244
Лабораторна робота № 2.5 Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги 253
Лабораторна робота № 2.6 Дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом 265
Лабораторна робота № Ф1 Дослідження пристроїв та систем електроживлення модульної структури 279
ЛІТЕРАТУРА 304

ЧАСТИНА 1

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

ВСТУП

Електроживлення систем зв'язку (ЕЖСЗ) належить до циклу дисциплін професійної й практичної підготовки фахівців зв'язку за напрямом "Телекомунікації". У дисципліні розглядаються стан і напрями розвитку електроживлення пристроїв та систем телекомунікацій у нашій країні та за кордоном.

Загальна характеристика дисципліни:

Кількість кредитів ECTS – 2,5; кількість модулів – 2; змістових модулів – 6; загальна кількість годин – 135; в тому числі: лекцій – 32; лабораторних занять – 18; практичних занять – 14; самостійна та індивідуальна робота – 71 годин.

Важливе місце в дисципліні "Електроживлення систем зв'язку" посідає вивчення основ теорії, методики інженерного розрахунку й проектування елементів, вузлів, блоків та систем електроживлення підприємств зв'язку. Головна увага приділяється якісному й кількісному аналізові процесів, які протікають у функціональних елементах та пристроях систем електроживлення й електропостачання.

Дисципліна базується на положеннях курсів вищої математики, фізики, теорії лінійних та нелінійних електричних кіл, основ схемотехніки, інформатики, обчислювальної техніки й інформаційних технологій та ін.

Задачею дисципліни є розширення та поглиблення головних положень зазначених дисциплін у напрямі використовування нових методів для теоретичного аналізу й розрахунку характеристик процесів, які протікають в елементах та пристроях силової перетворювальної техніки.

Програма дисципліни складається з двох модулів.

Структура залікового модуля 1

Змістовний модуль	Лекції (лк)	Заняття		Самостійна робота (у тому числі інд. завд.)	Індивідуальна робота
		практичні (пз)	лабораторні (лб)		
Модуль 1: **Електромагнітні та випрямляючі пристрої засобів електроживлення** **Навчальний час:** ***лк – 16 г., пз – 8 г., лб – 8 г.***					
1. Трансформатори, Електричні реактори (дроселі), Магнітні підсилювачі	8	2	2	8	
2. Випрямлячі	6	4	4	12	
3. Згладжувальні фільтри	2	2	2	3	
4. Тематика додаткового до лекцій матеріалу				10	
Разом	16	8	8	33	

Структура залікового модуля 2

Змістовний модуль	Лекції (лк)	Заняття		Самостійна робота (у тому числі інд. завд.)	Індивідуальна робота
		практичні (пз)	лабораторні (лб)		
Модуль 2: **Пристрої та системи електроживлення та електропостачання телекомунікаційних систем** **Навчальний час:** ***лк – 16 г., пз – 6 г., лб – 10 г.***					
1. Статичні перетворювачі постійного струму	8	3	6	14	
2. Стабілізатори напруги	4	2	2	7	
3. Системи електроживлення	4	1	2	7	
3. Тематика додаткового до лекцій матеріалу				10	
Разом	16	6	10	38	

Зміст змістовних модулів

Модуль 1: Електромагнітні й випрямні пристрої засобів електроживлення

1.1 Електромагнітні пристрої електроживлення

Однофазні трансформатори. Трифазні трансформатори.

Спеціальні типи трансформаторів: автотрансформатори, вимірювальні трансформатори, трансформатори імпульсних перетворювачів постійної напруги. Основи розрахунку характеристик трансформаторів при їхньому дослідженні й проектуванні.

Електричні реактори (дроселі).

Магнітні підсилювачі.

1.2 Випрямлячі

Випрямні пристрої. Структури. Особливості побудови й функціонування на різні види навантажень, на низькій і високій частоті перетворювання електричної енергії.

Керовані й некеровані вентилі. Силові напівпровідникові діоди.

Багатофазний (*m*-фазний) некерований випрямляч.

Однофазний випрямляч. Принципи побудови. Схеми випрямляння.

Особливості функціонування схем випрямляння при живленні від мережі змінного струму з прямокутною формою напруги.

Трифазний випрямляч.

Синхронні випрямлячі. Принципи побудови й функціонування.

Показники якості схем випрямляння. Порівняльне оцінювання схем випрямляння. Застосовування схем випрямляння у пристроях електроживлення й у системах електроживлення підприємств зв'язку. Особливості розрахунку випрямлених пристроїв.

1.3 Згладжувальні фільтри

Засади побудови й функціонування згладжувальних фільтрів. Показники якості. Резонансні фільтри. Активні згладжувальні фільтри.

Тематика додаткового до лекцій матеріалу

Основи аналізу згладжувальних фільтрів. Вплив частоти на масогабаритні показники згладжувальних фільтрів. Перехідні й постійні процеси. Основні розрахункові співвідношення.

Порівняльне оцінювання згладжувальних фільтрів. Область використання. Застосування згладжувальних фільтрів, у пристроях та системах електроживлення.

Модуль 2: Пристрої та системи електроживлення й електропостачання телекомунікаційних систем

2.1 Статичні перетворювачі постійного струму

Перетворювачі постійної напруги. Призначення. Принципи побудови й функціонування. Класифікація. Область застосовування. Вимоги.

Високочастотні транзисторні інвертори. Однотактні перетворювачі постійної напруги.

Двотактні перетворювачі постійної напруги.

Шляхи підвищення техніко-економічних показників високочастотних перетворювачів постійної напруги. Резонансні, багатофазні перетворювачі із ШІМ, ЧІМ регулюванням і з використовуванням резонансних контурів.

Застосовування перетворювачів постійної напруги у пристроях та системах електроживлення.

Енергетичні втрати в елементах перетворювача. Залежність енергетичних втрат від частоти перемикання. Вибір оптимальної частоти.

2.2 Стабілізатори напруги та струму

Параметричні стабілізатори постійної та змінної напруги.

Компенсаційні стабілізатори постійної та змінної напруги і струму.

Компенсаційні стабілізатори з неперервним регулюванням.

Компенсаційні стабілізатори з імпульсним регулюванням. Регульовані й нерегульовані перетворювачі постійної напруги у структурах побудови стабілізаторів напруги та струму.

Стабілізуючі джерела електроживлення з безтрансформаторним входом. Системи керування. Принципи керування.

Застосовування стабілізаторів напруги та струму у пристроях апаратури зв'язку й системах електроживлення підприємств зв'язку.

2.3 Системи електроживлення апаратури й підприємств зв'язку

Системи електроживлення підприємств зв'язку.

Принципи забезпечення надійності й безперебійності електропостачання.

Електроживлення підприємств автоматичного й багатоканального електрозв'язку. Типове обладнання електроустановок. Дистанційне електроживлення апаратури зв'язку: транзисторних систем передавання, магістралей коаксіального й симетричного кабелів.

Електроживлення радіопередавальних, радіоприймальних і телевізійних центрів.

Електроживлення радіорелейних ліній. Принципи електроживлення. Вимоги. Системи безперебійного й гарантованого електроживлення.

Електроживлення супутникових і тропосферних систем передавання.

Електроживлення засобів телекомунікацій. Електроживлення обладнання поштового зв'язку.

Системи безперебійного електроживлення змінного й постійного струму.

Основні джерела енергопостачання стаціонарних і рухомих об'єктів. Акумулятори великої ємності для стаціонарної й переносної апаратури. Зарядні пристрої.

Питання резервування й надійності в системах електропостачання. Техніко-економічне порівняння різних систем електропостачання. Рекомендації й вибір.

Пристрої й системи електроживлення та електропостачання засобів телекомунікацій. Тенденції й напрями подальшого розвитку й удосконалювання. Шляхи підвищення техніко-економічних показників. Способи й засоби забезпечення енерго- та ресурсозбереження при здійснюванні телекомунікаційних процесів.

Перелік лабораторних робіт модуля 1

№ пп.	Тема	Години
1	Визначення параметрів однофазного трансформатора	2
2	Дослідження однофазного трансформатора під навантаженням	2
3	Дослідження однофазної мостової схеми випрямляння	2
4	Дослідження однотактної однофазної й трифазної схем некерованих випрямлячів	2
5	Дослідження трифазних схем випрямлячів	2
6	Дослідження однотактної однофазної й трифазної схем керованих випрямлячів	2
7	Дослідження згладжувальних фільтрів	4

Перелік лабораторних робіт модуля 2

№ пп.	Тема	Години
1	Дослідження перетворювача постійної напруги із самозбудженням	2
2	Дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів)	6
3	Дослідження півмостового перетворювача постійної напруги	2
4	Дослідження тиристорного інвертора	2
5	Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги	2
6	Дослідження інтегрального стабілізатора напруги	2
7	Дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом	4

Перелік факультативних лабораторних робіт

№ пп.	Тема	Години
1	**2**	**3**
	Дослідження пристроїв і систем електроживлення модульної структури з однофазною та багатофазною принципами перетворювання:	
1	з силовими каналами знижувального типу	2
2	з силовими каналами підвищувального типу	2
3	з силовими каналами полярно-інвертувального типу	2
4	з силовими каналами з прямим увімкненням діода	2
5	з силовими каналами зі зворотним увімкненням діода	2

Продовження таблиці

1	2	3
6	з силовими каналами з виводом середньої точки трансформатора	2
7	з силовими каналами мостового типу	2
8	з півмостовими силовими каналами	2

Розпочинаючи вивчення дисципліни “Електроживлення систем зв'язку”, треба знати:

- математичний апарат (теорії диференційного й інтегрального числення, гармонічного аналізу, ...) – “Вища математика”, модулі 1…4;
- фізичні закони й поняття (електрика, магнетизм, гармонічні коливання, ...) – “Фізика”, модулі 1…3;
- теорію електричних кіл (частотні, часові й операторні методи аналізу, дискретні кола й сигнали, теорію магнітних та трифазних кіл) – “Теорія електричних кіл і сигналів”, модулі 1…5;
- теорію напівпровідникових приладів, аналогову й цифрову схемотехніку – “Основи схемотехніки”, модулі 1…4;
- алгоритмічні мови, програмування й цифрове моделювання – “Інформатика”, модулі 1…4.

Після вивчення модуля 1 студент повинен:

- знати засади структурної, функціональної та схемотехнічної побудови й функціонування випрямних пристроїв та їхніх функціональних вузлів (трансформаторів, схем випрямляння і згладжувальних фільтрів);
- знати фізичні процеси, які відбуваються в елементах та колах пристроїв випрямляння, питання їхнього розрахунку із залученням обчислювальної техніки;
- знати техніко-економічні й експлуатаційні характеристики, основні напрямки та перспективи розвитку випрямних пристроїв;
- уміти за допомогою довідкової літератури розраховувати й обирати елементи силової частини та пристроя керування й експериментально визначати основні показники якості випрямних пристроїв;
- уміти розробляти випрямні пристрої з необхідними техніко-економічними показниками, технічно грамотно здійснювати експлуатування випрямних пристроїв;
- уміти ставити й розв’язувати завдання аналізу, дослідження й розробки випрямних пристроїв.

Вихідні знання й уміння після вивчення модуля 2:

- науково-практичний фундамент: поняття, засади, ідеї, конструкції й можливості, основи теорії, знання основних технічних характеристик, основ інженерного розрахунку перетворювачів електричної енергії – пристроїв та систем електроживлення засобів телекомунікацій;
- вміння використовувати обчислювальну техніку задля дослідження електричних процесів та проектування перетворювачів електричної енергії;
- теоретичні основи для більш глибокого вивчення перспективних напрямів розвитку силової електроніки, силової перетворювальної техніки;
- знання фізичних процесів, техніко-економічних та експлуатаційних характеристик, основних напрямів та перспектив розвитку силової перетворювальної техніки;
- теоретичні основи для більш глибокого вивчення приватних питань, які виникають у практичній діяльності при досліджуванні, проектуванні й експлуатуванні пристроїв та систем електроживлення;
- одержання неперервної математичної підготовки при вивчанні курсу, набуття навичок розв’язування конкретних інженерних завдань на підставі математичних та спеціальних знань.

У пропонованому лабораторному практикумі в першій частині (Частина 1 – Теоретичні положення) наведено принципи побудови й функціонування перетворювачів електричної енергії, особливості їхньої структурної, функціональної та схемотехнічної реалізації.

У другій частині (Частина 2 – Методичні вказівки) подано запитання щодо підготовки й виконання кожної лабораторної роботи, контрольні тест-запитання, перелік рекомендованої літератури, рекомендації з теоретичного вивчення й експериментального дослідження пристроїв та систем електроживлення, застосовуваних у засобах телекомунікацій.

МОДУЛЬ 1

1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ВИПРЯМНІ ПРИСТРОЇ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

1.1 До дослідження режимів роботи випрямного пристрою (однофазної мостової схеми випрямляння та згладжувальних фільтрів)

На практиці існує потреба визначання параметрів всіх функціональних елементів схеми, їхнього розрахунку чи то вибору за довідковою літературою. Вихідними даними для цього є напруга й струм у колі навантаження, величина пульсації випрямлюваної напруги, а також параметри мережі живлення. Теорію й питання щодо проектування пристроїв випрямляння докладно подано в літературі [1...10].

1.1.1 Випрямні пристрої. Загальні відомості

Випрямний пристрій (випрямляч) – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворювання змінної напруги (струму) на постійну.

Випрямні пристрої використовуються як автономно, так і у складі інверторів, перетворювачів постійної напруги на постійну та стабілізаторів як основний функціональний елемент (рис. 1.1).

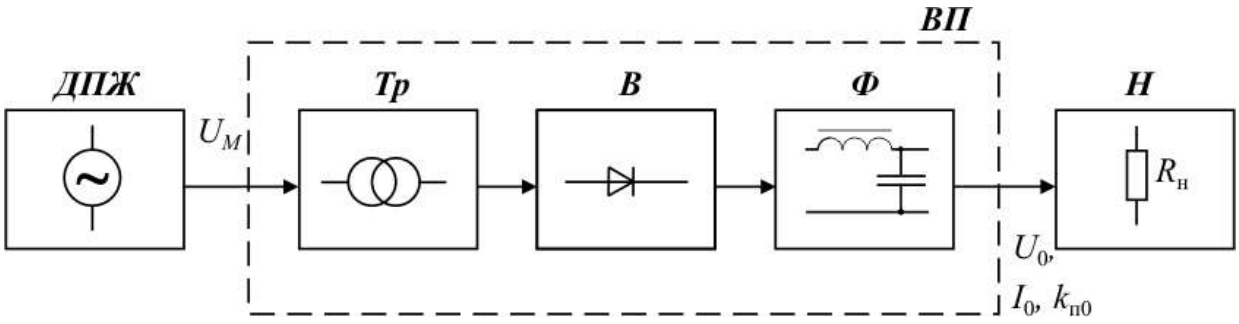


Рисунок 1.1 – Структурна схема випрямного пристрою

Випрямний пристрій ***ВП*** складається із трьох основних функціональних елементів.

Трансформатор ***Тр*** призначено для перетворювання величини напруги $\boldsymbol{U_м}$ джерела первинного живлення ***ДПЖ*** до значення $\boldsymbol{U_2}$, необхідного для одержання середньої випрямленої напруги $\boldsymbol{U_0}$ у колі навантаження ***Н***, перетворювання кількості фаз змінної напруги та забезпечення електричної (гальванічної) розв'язки навантаження ***Н*** від первинного джерела ***ДПЖ***.

Блок випрямляння – блок напівпровідникових приладів ***В*** – призначено для перетворювання роду струму (зі змінного на постійний пульсуючий), а також кількості фаз ***m*** випрямляння:

$$m = pq, \qquad (1.1)$$

де p – кількість фазних обмоток вторинного кола трансформатора ***Тр***; q – кількість імпульсів струму, які проходять однією фазною обмоткою за один період перетворюваної напруги.

Згладжувальний фільтр ***Ф*** зменшує вміст змінних складових у спектрі вихідної напруги. Він призначений для зменшування (згладжування) пульсацій випрямлюваної напруги чи то струму до величини, припустимої для нормальної роботи споживача.

Основним елементом, за допомогою якого відбувається перетворювання змінної напруги (струму) на постійну (постійний), є *електричний вентиль*. Під електричним вентилем розуміється функціональний елемент, який має властивість однобічної провідності внаслідок здатності стрибкоподібно змінювати величину опору протіканню електричного струму залежно від знака прикладеної напруги.

Основним функціональним елементом сучасних напівпровідникових випрямних пристроїв є напівпровідниковий вентиль з однобічною провідністю *p-n* переходу.

У реальних умовах режими роботи всіх елементів пристроїв випрямляння є взаємозалежні. Процеси, що протікають у різних частинах схеми випрямляння, залежать від характеру навантаження, спаду напруги у трансформаторі, вентилях, в елементах згладжувального фільтра. На практиці випрямлячі можуть працювати на активне навантаження, коли воно є некритичне до рівня змінної складової випрямлюваної напруги. Для зменшення пульсацій випрямлюваної напруги поміж блоком вентилів і навантаженням вмикаються згладжувальні фільтри, які містять певні індуктивності та ємності. У деяких випадках саме навантаження містить елементи з індуктивністю, ємністю та зовнішньою е. р. с. Наявність навантаження з індуктивним чи то ємнісним характером змінює режим роботи вентиля і схеми в цілому порівняно з роботою на навантаження активного характеру. Це призводить до зміни величини та форми випрямлюваної напруги і струму, а також струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора.

1.1.2 Вибір схеми випрямляння, типу фільтра та вентиля

Схеми випрямних пристроїв, застосовуваних для живлення апаратури зв'язку, наведено на рис. 1.2. Зазвичай вихідні дані та тип мережі живлення змінного струму (джерела первинного електроживлення (***ДПЖ***)) задано при проектуванні випрямного пристрою. У деяких випадках тип мережі (однофазна чи трифазна) обирається при проектуванні.

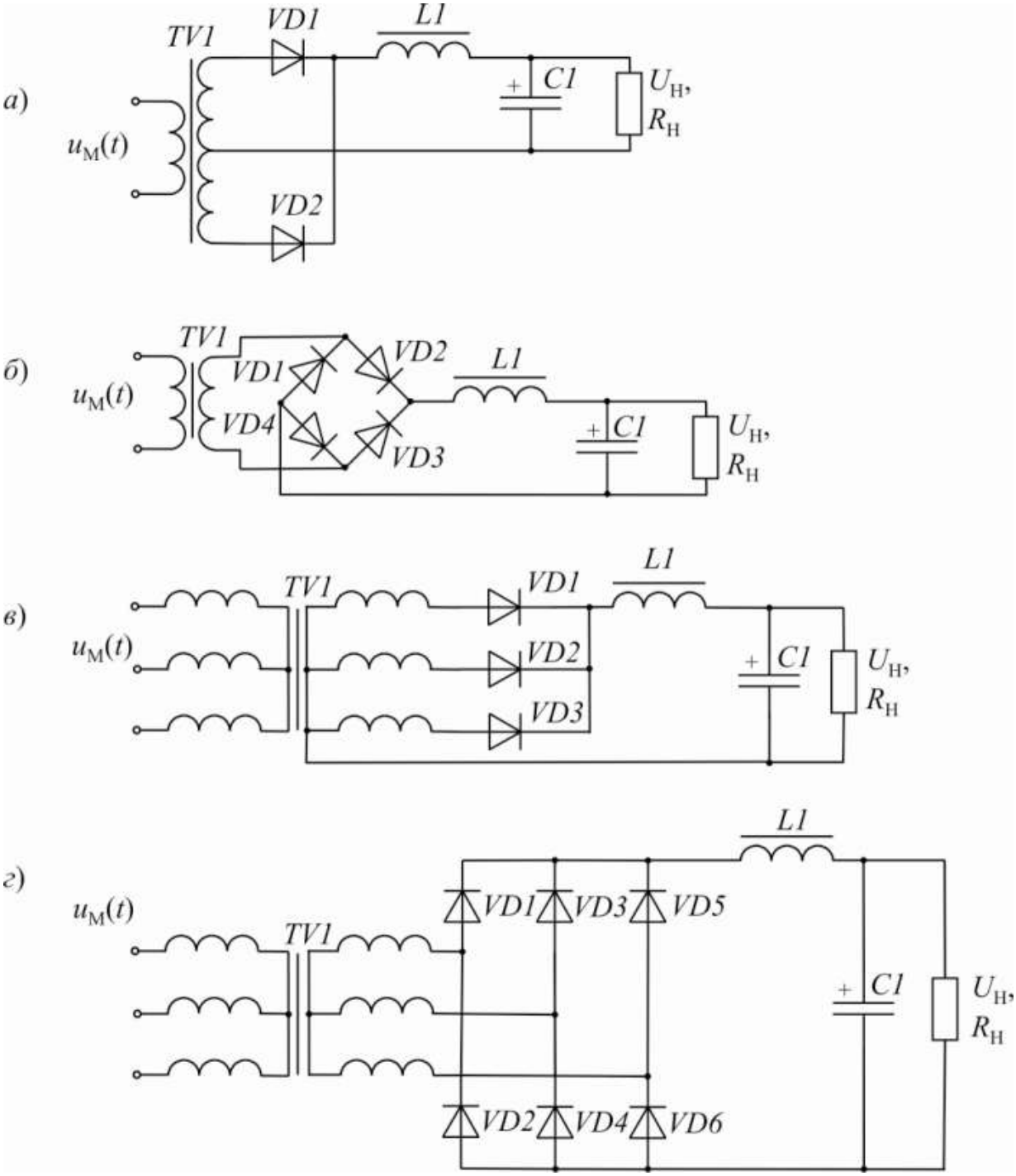


Рисунок 1.2 – Принципові схеми випрямних пристроїв: однотактна двофазна (*а*), двотактна однофазна (*б*), однотактна трифазна (*в*), двотактна трифазна (*г*)

Кількість фаз мережі живлення визначається вихідною потужністю випрямного пристрою: за потужності до **1 кВт** застосовують однофазну мережу, за потужності понад **1 кВт** – трифазну. Зазначена межа потужності є орієнтовною (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – **Технічні характеристики схем випрямляння**

Схема випрямляння	**Область оптимального використовування**
Однотактна двофазна (рис. 1.2, *а*)	$P_0 < 0{,}3$ **кВт**; $U_0 < 5...30$ **В**; $I_0 = 1...100$ **А** **найчастіш за** $U_0 < 10$ **В**
Двотактна однофазна схема Греца (рис. 1.2, *б*)	$P_0 < 1$ **кВт**; $U_0 = 30...1000$ **В**; $I_0 = 1...100$ **А**
Однотактна трифазна (рис. 1.2, *в*)	$P_0 > 0{,}3...1$ **кВт**; $U_0 < 10...100$ **В**; $I_0 = 1...10$ **А**
Двотактна трифазна схема Ларіонова (рис. 1.2*, г)*	$P_0 \geq 1$ **кВт**; $U_0 < 20$ **кВ**; $I_0 = 0{,}1...100$ **кА**;

У симетричній трифазній мережі миттєва потужність є постійна, коефіцієнт використовування проводів по передаваній потужності є більше, а ніж в однофазній мережі. Тому за $P_0 > 1$ **кВт** три проводи мережі коштуватимуть дешевше за два проводи однофазної мережі і варто обирати трифазну мережу.

Від вибору схеми випрямляння залежить методика розрахунку параметрів трансформатора і згладжувального фільтра.

Вибір конкретної схеми випрямляння здійснюється на підставі аналізу вихідних даних. При виборі враховуються такі параметри, як середнє значення (стала складова) випрямлюваної напруги $U_н \approx U_0$**,** струму навантаження I_0, припустимий коефіцієнт пульсацій $k_{п0}$ в колі навантаження H та потужність у колі навантаження випрямляча $P_0 = U_0 I_0$.

Мережа живлення змінного струму характеризується напругою $U_м$ (ефективне значення), частотою $f_м = 50$ **Гц** та кількістю фаз (однофазна, трифазна).

За потужності випрямляча понад 100 Вт застосовування фільтра LC типу, який зумовлює прямокутну форму струму, забезпечує максимальний коефіцієнт використання силового трансформатора, отже призводить до зниження вартості випрямляча в цілому**.**

Для обраної схеми випрямляння (див. табл. 1.1) визначання типу вентиля відбувається за значеннями, наведеними у табл. 1.2 (де m – кількість фаз випрямляння).

Вентиль має забезпечувати середнє значення $I_{пр\ сер}$ й амплітудне значення $I_{пр\ m}$ прямого струму для обраної схеми.

Вентиль має мати найменший зворотний струм за наявної в схемі випрямляча зворотної напруги (наявність цього струму призводить до додаткових енергетичних втрат, зменшення коефіцієнта корисної дії й погіршення якості випрямленої напруги).

Таблиця 1.2 – **До вибору типу вентиля (за роботи з *LC* фільтрами)**

Схема випрямляння	***m***	$I_{\text{пр } m}$	$I_{\text{пр сер}}$	$U_{\text{звор}}$
Однотактна двофазна (рис. 1.2, *а*)	**2**	I_0	$I_{0/2}$	$3{,}14U_0$
Двотактна однофазна схема Греца (рис. 1.2, *б*)	**2**	I_0	$I_{0/2}$	$1{,}57U_0$
Однотактна трифазна (рис. 1.2, *в*)	**3**	I_0	$I_{0/3}$	$2{,}10U_0$
Двотактна трифазна схема Ларіонова (рис. 1.2, *г*)	**6**	I_0	$I_{0/3}$	$1{,}05U_0$

Вентиль має мати високу електричну міцність (визначається величиною зворотної припустимої напруги $U_{\text{звор прип}}$). За вентиль обирається такий, у якого припустима зворотна напруга $U_{\text{звор прип}}$ буде більше (не менш за 20 %) зворотної напруги $U_{\text{звор}}$ в обраній схемі випрямляння, а припустимий прямий струм $I_{\text{пр прип}}$ більше (не менш за 20 %) максимального значення струму $I_{\max}$, який протікає через вентиль, тобто $I_{\text{пр прип}} \geq 1{,}2\ I_{\max}$. Необхідно так само, щоб його гранична частота $f_{\text{гран}} > 1$ **кГц** при $f_{\text{м}} = 50$ **Гц**.

1.1.3 Показники якості випрямлячів

Оцінювання ефективності використовування напівпровідникових елементів у схемі випрямляння провадиться коефіцієнтами використовування елементів за напруги k_U та зі струму k_i:

$$k_U = U_{\text{звор}} / U_0; \tag{1.2}$$

$$k_i = I_{\text{пр } m} / I_{\text{пр сер.}} \tag{1.3}$$

Для характеристики ефективності функціонування схем випрямляння використовують показник якості – коефіцієнт схеми $k_{\text{сх}}$, який характеризує зв'язок поміж діючим значенням змінної напруги U_2, яка надходить на напівпровідникові елементи, і середнім значенням випрямленої напруги $U_{\text{н}} = U_0$:

$$k_{\text{сх}} = U_{\text{н}} / U_2. \tag{1.4}$$

Випрямлені напругу $u_{\text{в}}(t)$ та струм $i_{\text{в}}(t)$ можна подавати у вигляді суми двох складових: постійної, тобто середнього значення $U_0(I_0)$, та змінної $u_{\text{в}\sim}$ ($i_{\text{в}\sim}$), які являють собою змінну напругу (струм) несинусоїдної форми.

У відповідності з розвиненням періодичної функції в ряд Фур'є, її середнє значення визначається як

$$U_0 = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{в}}(t)dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_{\text{в}}(\omega t)d\omega t\,. \tag{1.5}$$

Несинусоїдну напругу можна подати у вигляді суми гармонічних напруг

$$u_{в\sim} = \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(nm\omega t + \varphi_n), \qquad (1.6)$$

де n – номер гармоніки; m – кількість пульсацій у випрямленій напрузі за один період змінної напруги мережі живлення; $\omega = 2\pi f_м$ – кутова частота напруги мережі живлення; U_{nm} – амплітуда n-ої гармоніки; φ_n – початкова фаза n-ої гармоніки.

Пульсації (вміст змінних складових у випрямленій напрузі) оцінюються значенням коефіцієнта пульсацій $K_{пU}$. Існують такі визначення коефіцієнтів пульсації:

$$K_{пU1} = U_{1m}/U_0; \quad K_{пU2} = \Delta U_{в\sim}/2U_0; \quad K_{пU3} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \Big/ U_0, \qquad (1.7)$$

де U_n – діюче значення n-ної гармоніки ($U_n = U_{nm}/\sqrt{2}$); $\Delta U_{в\sim}$ – розмах пульсації випрямленої напруги; U_{1m} – амплітуда першої гармоніки.

Ефективність згладжувального фільтра випрямного пристрою оцінюють за його здатністю зменшувати пульсацію напруги (струму) за значенням коефіцієнта згладжування за напругою S_U (за струмом S_i):

$$S_U = K_{пвU}/K_{пнU}; \qquad S_i = K_{пв}/K_{пн}, \qquad (1.8)$$

де $K_{пвU}, K_{пнU}$ ($K_{пв}, K_{пн}$) – коефіцієнти пульсацій напруг (струмів) на вході (до фільтра) і виході (після фільтра).

1.2 До дослідження трифазних схем випрямлячів

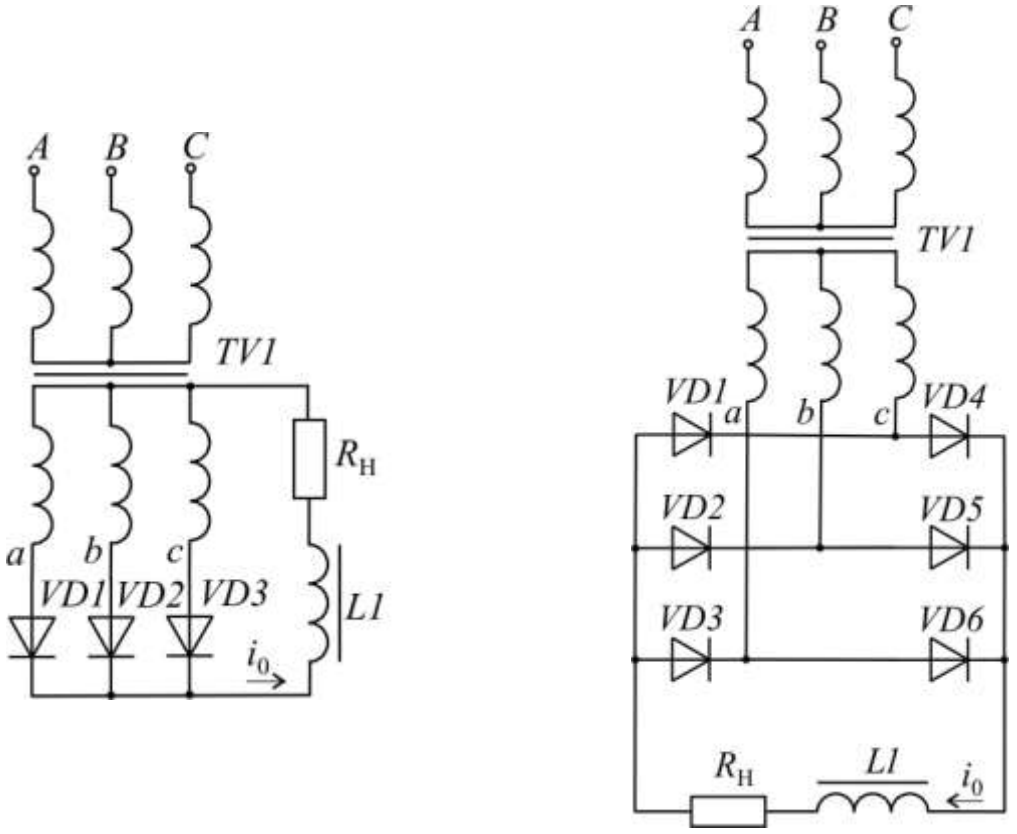
1.2.1 Трифазні випрямлячі. Загальні відомості

Для електроживлення споживачів середньої та великої потужності на практиці широко використовуються схеми випрямлячів трифазного живлення. Силові трансформатори таких випрямлячів складаються з трифазних первинної й вторинної обмоток. Первинні обмотки з'єднуються в зірку або в трикутник. Вторинні обмотки за допомогою спеціальних схем з'єднування дозволяють діставати випрямлену напругу з кількістю пульсацій за період мережі живлення, кратною трьом. Це дозволяє зі збільшенням пульсацій у випрямленій напрузі значно зменшити об’єм та масу згладжувальних фільтрів або взагалі скасувати їхнє використання.

Використовування трансформатора у випрямному пристрої дозволяє перетворювати величину вхідної напруги, забезпечувати гальванічну розв'язку первинного джерела живлення й кіл навантаження, змінювати кількість фаз.

При використовуванні трифазних випрямлячів забезпечується рівномірне навантаження на трифазну мережу. Підвищується й коефіцієнт використовування трифазного трансформатора випрямного пристрою.

За трифазної системи напруг первинного джерела електроживлення використовуються трифазні випрямлячі, виконані за трифазною однотактною (рис. 1.3, *а* – схема Миткевича) і двотактною мостовою (рис. 1.3, *б* – схема Ларіонова) схемам випрямляння.



а) *б*)

Рисунок 1.3 – Принципові схеми трифазних випрямлячів: однотактна (*а*), двотактна (*б*)

Трифазна однотактна схема застосовується в потужних випрямних пристроях за середніх значень випрямленої напруги до кіловольтів та середніх значень струму навантаження – до сотень ампер.

Трифазна двотактна схема широко застосовується у випрямних пристроях середньої й великої потужності для здобуття постійної напруги до десятків кіловольтів при навантаженні до сотень амперів. За всіма показниками якості ця схема перевершує всі існуючі схеми. Трифазні схеми випрямляння (однотактна і двотактна) характеризуються вельми високою надійністю та економічністю.

Трифазну однотактну схему можна розглядати як сполучення трьох однофазних однотактних випрямлячів, працюючих на загальне навантаження, в яких напруги зміщено за фазою на 120˚ одна стосовно одної. Кожного моменту часу електрична енергія надходить до кола навантаження

лише від однієї фази вторинної обмотки трансформатора, яка на аноді власного вентиля створює найбільший позитивний потенціал відносно спільної точки. Тривалість роботи кожного вентиля становить $2\pi/3$.

В ідеалізованій схемі перехід струму з однієї фази на другу (перемикання фаз) відбувається миттєво в моменти рівності напруг цих фаз, а їхнє чергування відповідає порядкові проходження фаз вторинної сторони трансформатора. За активного характеру навантаження випрямлений струм $i_0(\omega t)$ (і напруга $u_0(\omega t)$), який є сумарним струмом фаз випрямляча, які працюють по черзі, має форму обвідної кривої фазних напруг, тобто кожного моменту часу струм пропускає лише один вентиль. Частота першої гармоніки пульсації у колі навантаження є втричі вища за частоту первинної напруги.

Трансформатор трифазної однотактної схеми випрямляння працює з постійним підмагнічуванням, тому що струми у фазних обмотках не змінюють напрямку за період перетворювання напруги, а магнітні потоки, утворювані ними, не компенсуються. Трифазна двотактна схема випрямлення (схема Ларіонова – рис. 1.3, *б*) побудована за мостовим принципом.

1.2.2 Особливості функціонування трифазних випрямлячів

За активного характеру навантаження в схемі рисунка 1.3, *б* кожного моменту часу під впливом найбільшої лінійної напруги двох фаз імпульс випрямленого струму $i_0(\omega t)$ пропускають два вентилі: у катодній групі – той, анод якого має найвищий потенціал, а в анодній групі – той, потенціал катода якого є найнижчий.

Комутація струму з одного вентиля на наступний у даній групі відбувається в моменти рівності миттєвих значень фазних напруг суміжних фаз вторинної сторони трансформатора. У трансформаторі випрямляча відсутнє постійним підмагнічування, тому що кожна фаза працює двічі за період. При цьому напрямок струмів є зустрічний, що забезпечує компенсацію сталих складових.

Середнє значення випрямленої напруги U_0 (стала складова) обчислюється для розглянутих схем рис. 1.3 для інтервалу повторюваності випрямленої напруги $2\pi/m$ (для трифазної однотактної схеми випрямлення фазність $m = 3$, для мостової $m = 6$):

$$U_0 = \frac{m}{2\pi}\int_{-\pi/m}^{\pi/m} U_{2m}\cos\omega t\, d\omega t = \frac{m}{\pi}U_{2m}\sin\frac{\pi}{m}; \qquad (1.9)$$

$$U_0 = \begin{cases} 1.17U_2 & \text{за} \quad m = 3; \\ 2.32U_2 & \text{за} \quad m = 6. \end{cases} \qquad (1.10)$$

За активного навантаження форми кривих випрямленого струму й напруги однакові, тому середнє значення випрямленого струму I_0 визначається аналогічно до (1.9):

$$I_0 = \frac{m}{\pi} I_{2m} \sin\frac{\pi}{m}. \quad (1.11)$$

З (1.9) діюче значення напруги U_2 фази вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** визначається у вигляді

$$U_2 = U_0 \pi / (m\sqrt{2}\sin\frac{\pi}{m}); \quad (1.12)$$

$$U_2 = \begin{cases} 0.855U_0 & \text{за} \quad m = 3; \\ 0.427U_0 & \text{за} \quad m = 6. \end{cases} \quad (1.13)$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора I_2 і вентиля $I_в$ за $m = 3$ визначається як

$$I_2 = I_в = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/m}^{\pi/m} i_2^2 d\omega t} = I_{2m}\sqrt{\frac{1}{2m} + \frac{1}{4\pi}\sin^2\frac{\pi}{m}}; \quad (1.14)$$

$$I_{2m} = U_{2m} / R_н = I_0(\pi / m \sin\pi / m), \quad (1.15)$$

де I_{2m} – амплітуда струму вторинної обмотки трансформатора ***TV1***.

Оскільки в мостовій схемі випрямлення тривалість роботи фази є удвічі більше за тривалість роботи вентиля, то для $m = 6$

$$I_2 = \sqrt{2} I_{2m}\sqrt{\frac{1}{2m} + \frac{1}{4\pi}\sin^2\frac{\pi}{m}}. \quad (1.16)$$

У результаті, з урахуванням (1.11) та (1.15), дістанемо

$$I_2 = \begin{cases} 0{,}583\mathbf{I}_0 & \text{за} \quad m = 3; \\ 0{,}817\mathbf{I}_0 & \text{за} \quad m = 6. \end{cases} \quad (1.17)$$

Діюче значення струму у фазі первинної обмотки трансформатора визначається як

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_1^2(\omega t) d\omega t}; . \quad (1.18)$$

$$I_1 = \begin{cases} 0{,}48I_0 / n_{12} & \text{за} \quad m = 3; \\ 0{,}817I_0 / n_{12} & \text{за} \quad m = 6. \end{cases} \quad (1.19)$$

Амплітуда k-тої гармоніки випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ визначається як

$$U_{m\sim k} = \frac{m}{\pi}\int_{-\pi/m}^{\pi/m} u_0(\omega t)\cos km\omega t d\omega t = \frac{U_0 2}{(km)^2 - 1}; \quad (1.20)$$

$$U_{m\sim 1} = \begin{cases} 0.25U_0 & \text{за} \quad m = 3. \\ 0.057U_0 & \text{за} \quad m = 6. \end{cases} \quad (1.21)$$

Відповідно коефіцієнти пульсацій k-тої гармоніки $K_{пk}$ і першої гармоніки $K_{п1}$ визначаються у вигляді

$$K_{\text{п k}} = 2/ (km)^2 - 1 ;$$
$$K_{\text{п1}} = 2/(m^2 - 1). \qquad (1.22)$$

За роботи реального випрямляча на його функціонування значно впливають внутрішні активні опори $r_{\text{ф}}$ фази випрямляча ($r_{\text{ф}} = r_{\text{пр}} + r_{\text{тр}}$, де $r_{\text{пр}}$ – опір вентиля у відкритому провідному стані; $r_{\text{тр}}$ – активний опір обмоток трансформатора, приведений до вторинної обмотки) та індуктивності розсіювання обмоток трансформатора – первинної L_{b1} і вторинної L_{b2}. Ці опори визначаються з досліду короткого замикання вторинних обмоток трансформатора. За аналізу схем індуктивності розсіювання враховуються у вигляді спільних (для кожної фази) еквівалентних індуктивностей L_b, які являють собою суму індуктивності розсіювання L_{b2} вторинної обмотки й приведену за кількістю обвитків індуктивність розсіювання L'_{b1} первинної обмотки:

$$L_b = L_{b2} + L'_{b1}. \qquad (1.23)$$

Магнітні потоки розсіювання у трансформаторі впливають на параметри електромагнітних процесів у випрямлячах. Їхній характер залежить від конструктивних особливостей трансформаторів (форми магнітопроводу, конструктивного виконання обмоток тощо).

У низьковольтних випрямлячах малої потужності індуктивний опір L_b обмоток трансформатора є значно менше за активний опір $r_{\text{ф}}$. Тому потоками розсіювання при розгляданні електромагнітних процесів можна знехтувати і не враховувати їх у розрахунках при аналізі й проектуванні.

У випрямлячах великої потужності потоки розсіювання впливають на характер електромагнітних процесів, набагато потужніше за $r_{\text{ф}}$. Тому при аналізі режимів роботи пристрою величиною $r_{\text{ф}}$ можна знехтувати і треба враховувати вплив індуктивного опору L_b.

Схему трифазного однотактного випрямляча з урахуванням індуктивностей розсіювання обмоток трансформатора зображено на рис. 1.4.

Оскільки в колі навантаження перебуває дросель з вельми великим значенням індуктивності $L1$, то у ньому протікає постійний струм. Цей струм є сумою струмів фаз випрямляча, які протікають почергово (в інтервалі окремої роботи вентиля). Оскільки в колі кожної фази спостерігається індуктивність розсіювання, то струм у колі фази в інтервалі комутації не може змінюватися миттєво. Унаслідок цього відбувається одночасна робота двох фаз: струм однієї фази розпочинає плавно зменшуватися до нуля, а струм другої фази плавно збільшуватися від нуля до номінального значення. При цьому обидві фази працюють одночасно (див. рис. 1.5), забезпечуючи струм $I_{\text{н}}$ навантаження.

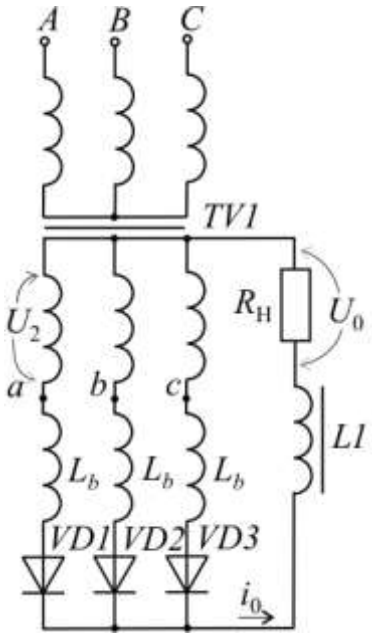


Рисунок 1.4 – Схема випрямляча з урахуванням індуктивності розсіювання обмоток трансформатора

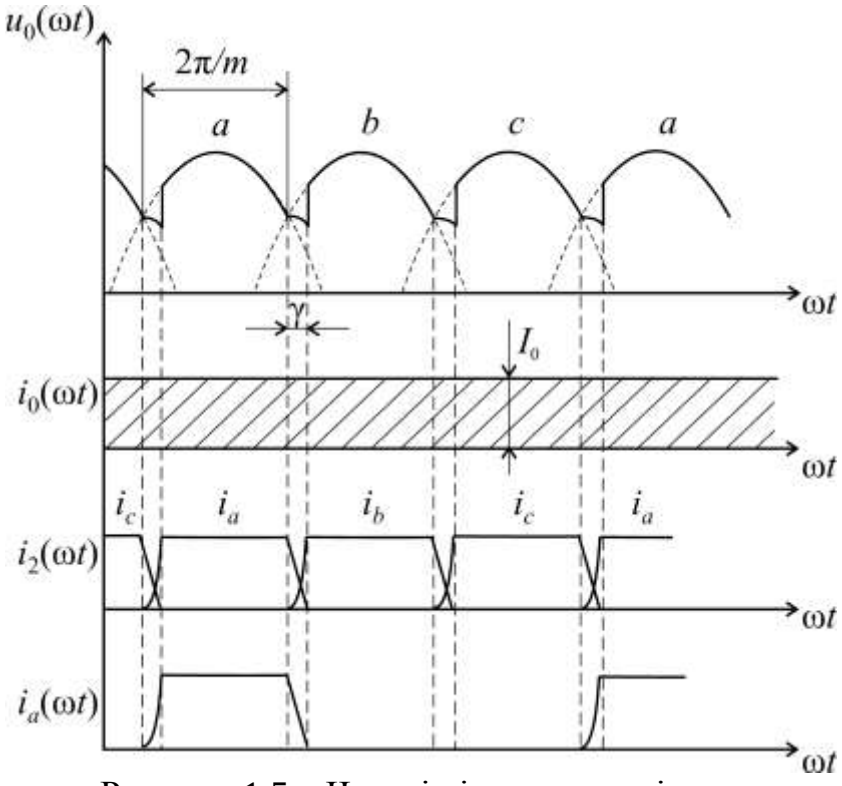


Рисунок 1.5 – Часові діаграми, що ілюструють електричні процеси в схемі рис. 1.4

Час, виражений у кутових одиницях, упродовж якого діють (одночасно працюють) обидві фази, називається кутом γ перекриття фаз (див. рис. 1.5):

$$\cos\gamma = 1 - I_0 m\omega L_b / \pi U_0, \qquad (1.24)$$

де I_0, U_0 – середні значення струму й напруги в колі навантаження відповідно; m – фазність схеми випрямляння випрямляча; $\omega = 2\pi f_м$ – кругова частота, $f_м$ – частота мережі живлення.

Кут γ перекриття фаз є пропорційний до струму навантаження, індуктивностей розсіювання обмоток трансформатора й кількості фаз випрямлення.

Перекриття фаз зменшує випрямлену напругу U_0, впливає на вигляд зовнішньої характеристики випрямляча:

$$U_0 = U_{0\,нс} - I_0 m\omega L_b / 2\pi, \qquad (1.25)$$

де $U_{0\,нс}$ – напруга на виході випрямляча у ненавантаженому стані.

Збільшуються й пульсація напруги у вихідному колі випрямляча і час роботи кожної фази (стає $2\pi/m + \gamma$ замість $2\pi/m$ в ідеалізованому випрямлячі за $L_b = 0$).

1.3 До дослідження однотактних керованих та некерованих випрямлячів

1.3.1 Однотактні керовані та некеровані випрямлячі. Загальні відомості

На практиці пристрої випрямляння мають забезпечувати окрім випрямляння ще й регулювання вихідної напруги. Функції випрямляння та регулювання електричної енергії, яка надходить від джерела первинного живлення до кола навантаження, можуть бути сполучені, при використовуванні керованих вентилів – *тиристорів*.

Специфіка тиристора полягає в його частковій керованості. Для переведення тиристора із закритого (непровідного) стану до відкритого (провідного) досить подати напругу на його керувальний електрод. Після зняття напруги керування тиристор продовжує перебувати у відкритому стані. Для вимикання тиристора (переведення до непровідного стану) треба або зменшити величину анодного струму практично до нуля (його величина має бути менша за струм вимикання) або забезпечити негативну полярність напруги на його аноді.

Регулювання вихідної напруги випрямляча можна реалізовувати, керуючи моментом вмикання тиристора. Це відбувається за подавання керувального сигналу із запізнюванням на кут α відносно початку позитивної півхвилі напруги на аноді тиристора.

Напруга на навантаженні збільшується при зменшенні кута α і спадає при збільшенні α. Регулювання випрямленої напруги досягається змінюванням фази керувальних імпульсів. При цьому тиристор працює у ключовому режимі з малими енергетичними втратами.

Тиристори є силовими напівпровідниковими приладами, вони відрізняються високими значеннями коефіцієнтів підсилення за струмом керування (понад 1000), а також великими значеннями робочих струмів та напруг. Принципи побудови керованих випрямлячів є аналогічні до принципів побудови некерованих.

Усі відомі схеми некерованих випрямлячів можуть бути наділені функціями регулювання, якщо в якості електричних вентилів використовувати керовані – тиристори.

При використовуванні керованих випрямлячів доцільно забезпечувати їх функціонування у стабілізаторах за вельми малого діапазону змінювання кута регулювання. За збільшення кута регулювання збільшується коефіцієнт пульсацій. Це призводить до збільшення об’єму й маси вихідного згладжувального фільтра.

Двотактні мостові випрямлячі з половинною кількістю керованих вентилів характеризуються більшою габаритною потужністю трансформатора і збільшеним коефіцієнтом пульсацій вихідної випрямленої напруги.

Використовування таких схем є виправдане лише за малих діапазонів зміни кута регулювання й некритичності до збільшення пульсацій напруги в колі навантаження порівняно, з повністю керованими.

Однотактні – однофазні (рис.1.6, *а*, *б*) і трифазні (рис. 1.6, *в*, *г*) схеми тиристорних випрямлячів наведено з навантаженнями активного й індуктивного характеру.

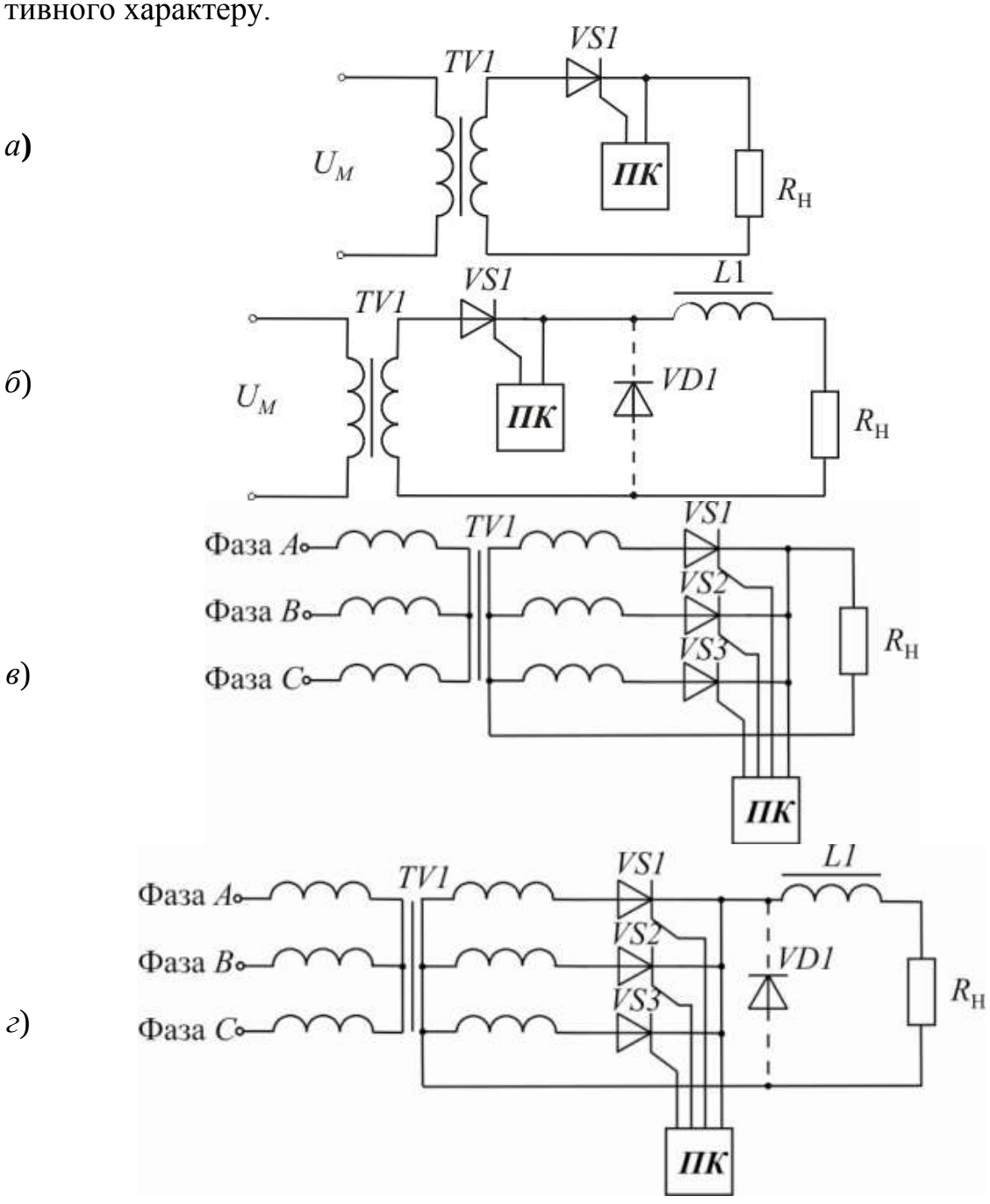


Рисунок 1.6 – Схеми однотактних тиристорних керованих випрямлячів: однофазних (*а* та *б*) і трифазних (*в* та *г*)

Трифазну однотактну схему випрямляння можна розглядати як сполучення трьох однофазних однотактних випрямлячів, які працюють на спільне навантаження, на вхідні кола яких впливає сукупність трьох однофаз-

них е. р. с. з однаковою частотою зі зсувом один відносно одного на одну третину періоду (кут 120º). При цьому замість трифазного трансформатора ***TV1***, як показано на рис. 1.6, *в, г*, може бути використано трансформаторну групу, яка складається з трьох однакових однофазних трансформаторів. Кожна зі схем містить блок випрямляння ***БВ***, який складається з тиристора ***VS1*** для однофазних схем (див. рис. 1.6, *а, б*) або ***VS1***…***VS3*** – для трифазних схем. Аноди тиристорів трифазних випрямлячів під'єднано до відповідних кінців *a, b, c* обмоток нижчої напруги, а катоди сполучено в єдину точку (рис. 1.6, *в*, *г*).

1.3.2 Робота однофазного однотактного випрямляча на активне навантаження

В однофазній однотактній схемі випрямляча (рис. 1.6, *а*) тиристор ***VS1*** сполучено послідовно з активним опором $R_н$ та вторинною обмоткою трансформатора ***TV1*** синусної змінної напруги (рис. 1.7, *а*). Пристрій керування ***ПК*** випрямляча, до виходу якого підімкнено керувальний електрод тиристора ***VS1***, формує синхронно зі змінною випрямленою напругою сигнал керування $u_к(\omega t)$ (рис. 1.7, *б*), фаза якого відносно фази напруги $u_2(\omega t)$ може регулюватися. У момент ωt_1 тиристор ***VS1*** відкривається й через нього в інтервалі $\omega t_1 \ldots \pi$ протікатиме прямий струм $i_0(\omega t)$ (рис. 1.7, *в*).

Струм $i_0(\omega t)$ на виході випрямляча (він же є струмом навантаження $i_н(\omega t) = i_0(\omega t) = u_0(\omega t)/R_н$) протікає доти, поки тиристор ***VS1*** не вимкнеться внаслідок зміни знака напруги $u_2(\omega t)$, тобто в момент $\omega t_2 = \pi$. Початок (момент) протікання струму $i_0(\omega t)$ може змінюватися шляхом регулювання кута α стосовно напруги $u_2(\omega t)$. Унаслідок цього, змінюючи співвідношення фаз початку протікання струму відносно фази прикладеної напруги $u_2(\omega t)$, можна регулювати величину напруги й струму від максимального значення за $\alpha = 0$ аж до нульового значення (звідси й поняття "фазове регулювання").

Середнє значення U_0 випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ (див. рис. 1.7, *в*) заактивного характеру навантаження визначається як

$$U_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{2m}\sin\omega t\, d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi}(1+\cos\alpha). \qquad (1.26)$$

За $\alpha = 0$ випрямлена напруга $u_0(\omega t)$ (див. рис. 1.7, *г*) буде такою самою, що й у некерованому однофазному однотактному випрямлячі, коли замість керованого електричного вентиля ***VS1*** (див. рис. 1.6, *а*) використовується некерований – діод. При цьому дістаємо максимальне значення $U_{0\,max}$ випрямленої напруги:

$$U_{0\,max} = U_{2m}/\pi. \qquad (1.27)$$

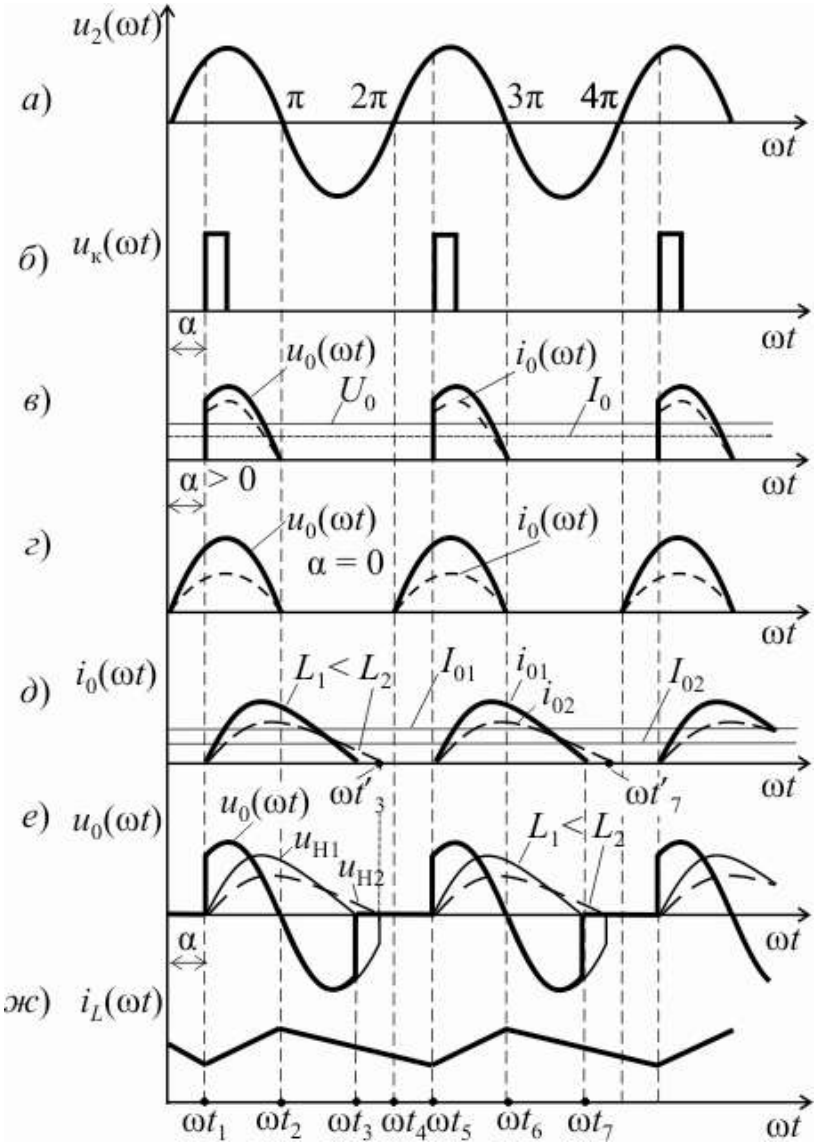


Рисунок 1.7 – Діаграми, які ілюструють електричні процеси в однофазній схемі керованого випрямляча за активного (*а*, *б*, *в*, *г*) та індуктивного (*а*, *б*, *д*, *е*, *ж*) характеру навантаження

За активного характеру навантаження крива випрямленого струму $\boldsymbol{i_0(\omega t)}$ повторює криву $\boldsymbol{u_0(\omega t)}$ (див. рис. 1.7, *в, г*), тому середнє значення випрямленого струму $\boldsymbol{I_0}$ визначається у вигляді

$$\boldsymbol{I_0 = \begin{cases} I_{2m}(1+\cos\alpha)/2\pi & \text{за } \alpha > 0; \\ I_{0\max} = I_{2m}/\pi & \text{за } \alpha = 0. \end{cases}} \tag{1.28}$$

Регулювальна характеристика для розглянутої схеми визначається у вигляді

$$\boldsymbol{\frac{U_0}{U_{0\max}} = \frac{I_0}{I_{0\max}} = \frac{1+\cos\alpha}{2}.} \tag{1.29}$$

На рис. 1.8 наведено регулювальну характеристику розглянутої схеми для випадку чисто активного навантаження.

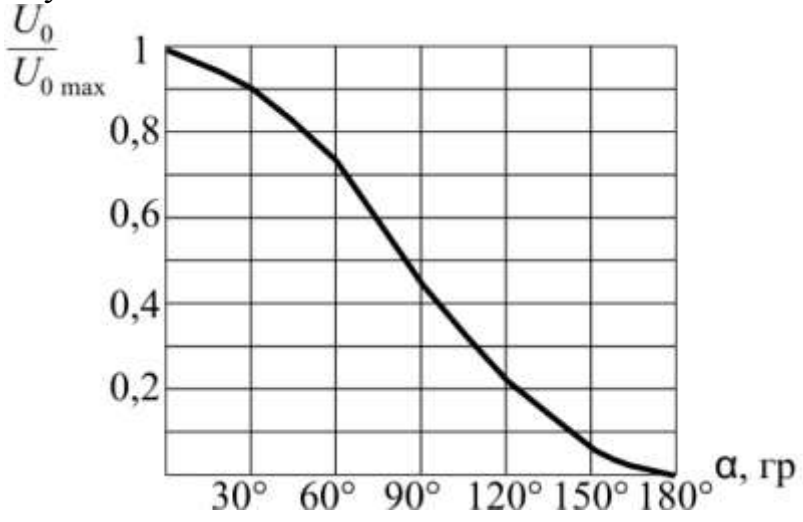


Рисунок 1.8 – Регулювальна характеристика однофазного однотактного керованого випрямляча за активного навантаження

1.3.3 Робота однофазного однотактного випрямляча на активно-індуктивне навантаження

Індуктивний характер навантаження однофазної однотактної схеми керованого випрямляча (див. рис. 1.6, *б*) призводить до зменшення швидкості змінювання струму $\boldsymbol{i_0(\omega t)}$ (див. рис. 1.7, *д*) на виході. Дросель ***L1*** накопичує енергію при протіканні струму $\boldsymbol{i_0(\omega t)}$**.** Зміна фази $\boldsymbol{u_2(\omega t)}$ у момент $\boldsymbol{\omega t_2}$ мала б призвести до зміщення тиристора ***VS1*** у зворотному напрямку, перервавши у такий спосіб коло протікання струму. Однак дросель ***L1*** прагне зберегти струм постійним, виникає е. р. с., що перешкоджає переходу ***VS1*** до розімкненого непровідного стану, і струм $\boldsymbol{i_0(\omega t)}$ зберігатиметься доти, допоки дросель ***L1*** не віддасть навантаженню $\boldsymbol{R_н}$ всю накопичену енергію. Це призводить до затягування моменту $\boldsymbol{\omega t_3}$ припинення струму щодо моменту $\boldsymbol{\omega t_2 = \pi}$ переходу напруги $\boldsymbol{u_2(\omega t)}$ (див. рис. 1.7, *а*) через нульове значення. Унаслідок цього крива випрямленої напруги $\boldsymbol{u_0(\omega t)}$ (див. рис. 1.7, *е*) матиме негативні ділянки $\boldsymbol{\omega t_2 \ldots \omega t_3}$, $\boldsymbol{\omega t_6, \ldots, \omega t_7}$.

Для інтервалу $\boldsymbol{\omega t_1 \ldots \omega t_3}$ провідності тиристора ***VS1*** запишемо

$$\boldsymbol{U_{2m} \sin\omega = \omega L \frac{di_0(\omega t)}{d\omega t} + R_н i_0(\omega t)}. \qquad (1.30)$$

Розв'язок рівняння (1.30) за початкових умов $\boldsymbol{\omega t_1 = \alpha}$, $\boldsymbol{i_0(\omega t_1) = 0}$ запишемо у вигляді

$$\boldsymbol{i_0(\omega t) = \frac{U_{2m}}{R_н} \cos\varphi \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{(\omega t - \alpha) R_н}{\omega L}} \right]}; \qquad (1.31)$$

$$\boldsymbol{\varphi = \operatorname{arctg}(\omega L / R_н)}. \qquad (1.32)$$

Середнє значення U_0 випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ визначається у вигляді

$$U_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\omega t_4} U_{2m}\sin\omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi}\left[\cos\alpha - \cos\omega t_4\right]. \qquad (1.33)$$

Аналогічний результат виходить і за $U_0 = I_0 R_н$ після інтегрування рівняння (1.31):

$$I_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\omega t_3} i_0(\omega t)\, d\omega t = U_{2m}\left[\cos\alpha - \cos\omega t_3\right] / 2\pi R_н . \qquad (1.34)$$

З рівняння (1.31) $i_0(\omega t_3) = 0$ при ωt_3 дістаємо

$$\sin(\omega t_3 - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)\mathrm{e}^{-\frac{R_н(\omega t_3 - \alpha)}{\omega L}} = 0 . \qquad (1.35)$$

З виразу (1.35) видно, що тривалість $\omega t_3 - \alpha$ протікання струму $i_0(\omega t)$ залежить від $\omega L / R_н$. Відповідно й середнє значення $U_н = U_0$ випрямленої напруги залежить не тільки від α, але й від $\omega L / R_н$. За $\omega L / R_н \to \infty$ тривалість протікання струму $i_0(\omega t)$ збільшується. Наприклад, $\omega t_3' - \alpha > \omega t_3 - \alpha$ за $L_2 > L_1$ (див. рис. 1.7, *д*). При цьому амплітуда пульсації струму $i_0(\omega t)$ зменшується. Зі збільшенням $\omega L / R_н$ постійна складова I_{02} (при $L = L_2$) (відповідно й постійна складова випрямленої напруги U_{02}) зменшується у порівнянні з I_{01} (при $L = L_1$) зі збільшенням $\omega L / R_н$ більш різко, що призводить до збільшення коефіцієнта пульсацій.

За $\omega L / R_н \to \infty$ тривалість протікання струму $i_0(\omega t)$ прагнутиме до $2\pi - \alpha$. З (1.34), прийнявши за $\alpha = 0$ й $\omega L / R_н \to \infty$, матимемо максимальне значення струму:

$$I_{0max} = U_{2m} / \omega L . \qquad (1.36)$$

З (1.36) видно, що вплив L на постійну складову струму $i_0(\omega t)$ є великий. Це означає, що зовнішня характеристика однофазного однотактного випрямляча з індуктивним характером навантаження є різко зменшується.

1.3.4 Підвищення ефективності керованих випрямлячів

Для усунення різкого спадання зовнішньої характеристики, зумовленої переривчастим – розривним характером випрямленого струму, а також з метою підвищення коефіцієнта потужності випрямляча до його схеми вводиться додатковий (нульовий, зворотний) діод (***VD1*** – рис. 1.6, *б*).

З моменту ωt_1 до $\omega t = \pi$ додатковий діод ***VD1*** перебуває у закритому непровідному стані, тому що до його катода прикладено позитивну півхвилю напруги $u_0(\omega t)$ (див. рис. 1.7, *а*). У момент $\omega t_2 = \pi$ відбувається зміна полярності $u_2(\omega t)$, додатковий діод ***VD1*** переходить до відкритого про-

відного стану. Це призводить до режиму короткого замикання: струм короткого замикання для додаткового діода ***VD1*** є прямим, а для керованого вентиля ***VS1*** – зворотним і він (***VS1***) переходить до закритого непровідного стану. Додатковий діод ***VD2*** продовжує залишатися у відкритому провідному стані за рахунок е. р. с. самоіндукції дроселя ***L***. На інтервалі ωt_2 **...** ωt_5 (тобто від π до $2\pi+\alpha$) електрична енергія в коло навантаження $R_н$ надходитиме від дроселя ***L*** (див. рис. 1.7, *ж*), тобто дросель ***L*** повертає накопичену на інтервалі ωt_1 **...** ωt_2 (від α до π) електричну енергію (рис. 1.7, *ж*). У момент $\omega t_5 = 2\pi+\alpha$ керуючий сигнал $u_к(\omega t)$ (див. рис. 1.7, *б*) забезпечує переведення керованого вентиля – тиристора ***VS1*** – до відкритого провідного стану. При цьому додатковий діод ***VD1*** на інтервалі $2\pi+\alpha$ **...** 3π опиняється під зворотною напругою: на його катод буде впливатиме позитивна півхвиля $u_0(\omega t)$ – рис. 1.7, *а*. Тому ***VD1*** в інтервалі $2\pi+\alpha$ **...** 3π перебуватиме в закритому непровідному стані.

Уведення до схеми додаткового вентиля ***VD1*** дозволяє змістити основну гармоніку струму первинної обмотки трансформатора ***TV1*** на кут $\alpha/2$. За відсутності ***VD1*** зсув фаз поміж струмом та напругою у первинному колі трансформатора ***TV1*** становитиме α. Як бачимо керовані випрямлячі з додатковим діодом мають більш високий коефіцієнт потужності, аніж випрямлячі без нього.

Уведення додаткового діода до схем керованих і некерованих випрямлячів призводить до зниження пульсації випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ та струму $i_L(\omega t)$ (див. рис. 1.7, *ж*) у дроселі ***L*** за рахунок ефективного забезпечення неперервного характеру струму $i_L(\omega t)$ за збільшення ***L***.

1.3.5 Робота трифазного однотактного керованого випрямляча на активний характер навантаження

Кожний з тиристорів ***VS1, VS2, VS3*** трифазної схеми під'єдано катодом до активного опору навантаження $R_н$ й анодом – до джерела синусоїдної змінної напруги $u_a(\omega t)$, $u_в(\omega t)$, $u_c(\omega t)$ фаз ***a***, ***b*** та ***c*** відповідно. За відсутності сигналів керування з пристроя керування ***ПК*** всі тиристори перебувають у закритому непровідному стані.

Кожний з тиристорів може переходити до відкритого провідного стану (але лише упродовж позитивної півхвилі анодної напруги) за впливу на керувальний електрод імпульсного сигналу керування $u_к(\omega t)$ з пристроя керування ***ПК***.

Форма напруги $u_0(\omega t)$ на виході блока випрямляння ***БВ*** для схеми рис. 1.6, *в* (оскільки опір навантаження $R_н$ має активний характер, то й форма струму $i_0(\omega t)$) після увімкнення тиристора є ідентична до форми прикладеної напруги (вважаємо, що спадання напруги на тиристорі є мале і становить біля **1 В**). У трифазній однотактній схемі керованого випрямляча навантаження вмикається між нульовою точкою трансформатора й като-

дами тиристорів. Керування тиристорами здійснюється імпульсами від пристрою керування ***ПК*** шляхом змінювання кута регулювання відносно моментів природного відкривання вентилів у некерованому випрямлячі (точки ωt_1, ωt_3, ωt_5 рис. 1.9).

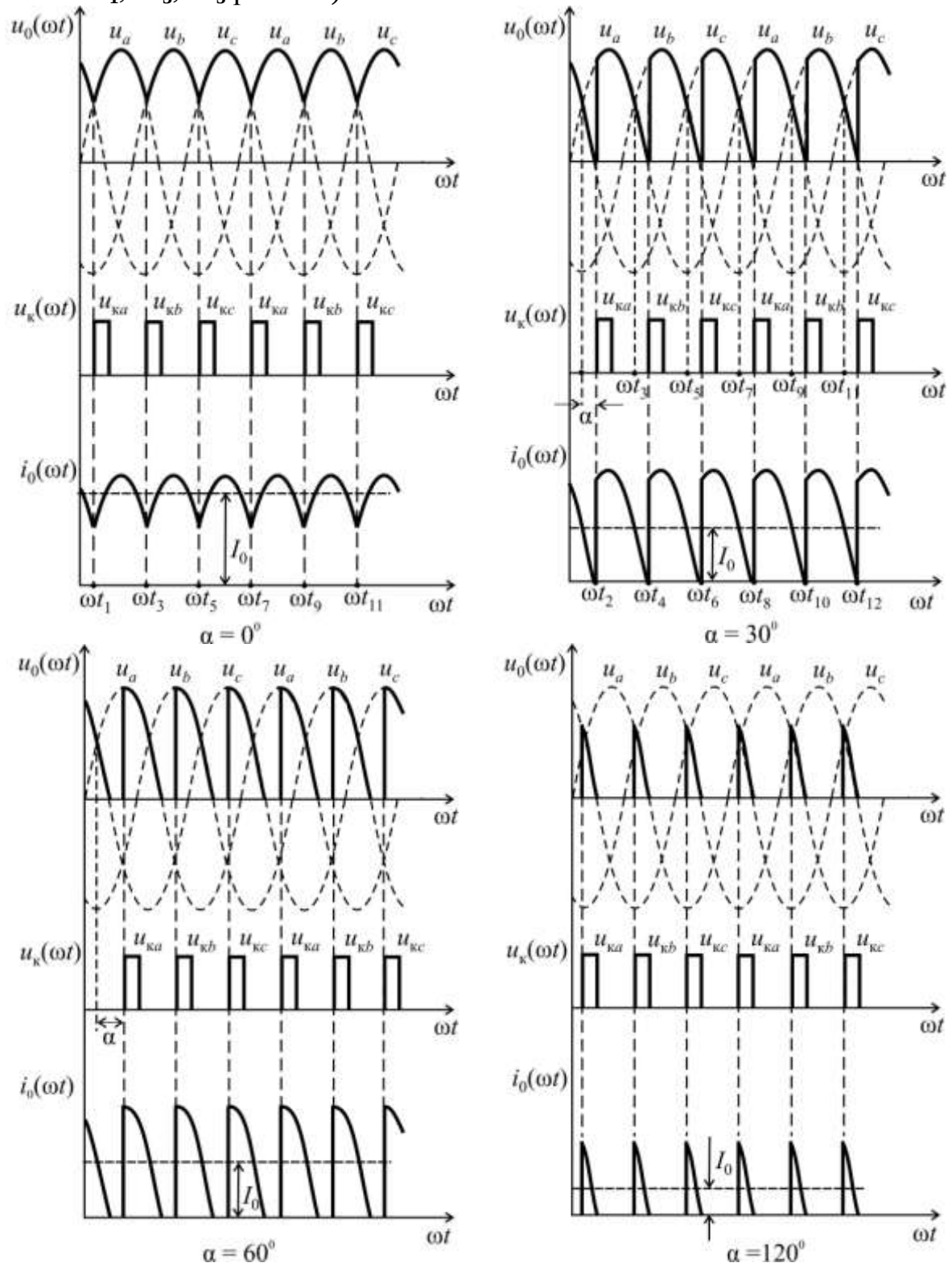


Рисунок 1.9 – Діаграми, які ілюструють процеси трифазної однотактної схеми керованого випрямляча за активного характеру навантаження

Принцип функціонування трифазних однотактних керованих випрямлячів відрізнюється від некерованих лише тим, що перемикання фаз випрямляння відбувається не в моменти ωt_1, ωt_3, ωt_5, … рівності фазних е. р. с., а пізніше на кут запізнювання α.

Розглянемо принцип дії схеми 1.6, *в* на активний характер навантаження за кута регулювання $\alpha = 30^0$ (рис. 1.9). У момент часу t_1 напруга $u_a(\omega t_1)$ фази *a* перевищує напругу фази *c*, але тиристор *VS3* залишається у відкритому провідному стані, оскільки тиристор *VS1* є закритий. У момент часу t_2 на керувальний електрод тиристора *VS1* подається імпульс керування $u_{ка}(\omega t_2)$ і він відкривається – переходить до відкритого провідного стану. При цьому тиристор *VS3* закривається – переходить до закритого непровідного стану, оскільки до нього прикладається зворотна напруга. Напруга на виході випрямляча стрибком зростає до напруги фази *a*. В інтервалі часу $t_2 \ldots t_4$ напруга $u_0(\omega t)$ на виході випрямляча формується напругою $u_a(\omega t_2) \ldots u_a(\omega t_4)$ фази *a*.У момент часу t_4 відкривається (сигналом керування $u_{кв}(\omega t_4)$ – рис. 1.9) тиристор *VS2*, а тиристор *VS1* закривається, тому що до нього прикладається зворотна напруга. Крива струму $i_0(\omega t)$ повторює форму кривої випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ (див. рис. 1.9). Змінювання фази імпульсів керування та кута регулювання α призводить до змінювання середніх значень випрямленої напруги U_0 і струму навантаження I_0. З рисунка 1.9 видно, що за кута регулювання $\alpha \le 30^0$ випрямлений струм має постійний характер. За кута регулювання $\alpha > 30^0$ у кривій випрямленої напруги $u_0(\omega t)$ виникають паузи, упродовж яких $i_0(\omega t) = 0$. На рис. 1.9 наведено діаграми напруг та струмів для $\alpha = 60^0$ і $\alpha = 120^0$.

Бачимо, що на відміну від схеми некерованого випрямляча або керованого, але працюючого з кутом $\alpha = 0$, за $\alpha > 0$ імпульси керування надходять на тиристори почергово із затримкою на кут керування α щодо моментів проходження через нуль лінійних напруг вторинних обмоток трансформатора *TV1*. Ці моменти часу відповідають точкам перетинання напруг $u_a(\omega t)$, $u_в(\omega t)$, $u_c(\omega t)$ (точки ωt_1, ωt_3, ωt_5, …– рис. 1.9).

За $\alpha = 0$ кожен тиристор проводить струм упродовж однієї третини ($2\pi/3$) кожного періоду мережі живлення.

За $\alpha = 0$ середня випрямлена напруга $U_{0\max}$ визначається як

$$U_{0\max} = \frac{3}{2\pi}\int_{\pi/6}^{5\pi/6}\sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = 1{,}17U_2, \qquad (1.37)$$

де U_2 – діюче значення напруги окремо взятої вторинної обмотки, тобто значення фазних напруг вторинних обмоток трансформатора *TV1* визначаються як $U_a = U_b = U_c = U_2$.

За $\alpha > 0$, залежно від характеру навантаження й значення кута α у даній схемі, можуть мати місце різні режими роботи.

Якщо кут α змінюється в діапазоні від 0 до $\pi/6$ **(0…30^0)**, то випрямлений струм є постійним як за активного, так і за активно-індуктивного навантаження. Для цього діапазону значень кута α за різного характеру навантаження середнє значення випрямленої напруги U_0 визначимо у вигляді

$$U_0 = \frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha}\sqrt{2}U_2\sin\omega t\,d\omega t = U_{0\max}\cos\alpha \quad \text{за } \alpha \le \frac{\pi}{6}. \tag{1.38}$$

Подальше збільшення кута ($\alpha > \pi/6$) за активного навантаження призводить до переривання випрямленого струму й появі ділянок з нульовими значеннями (див. рис. 1.9). Середнє значення напруги при цьому визначиться як

$$U_0 = \frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi}\sqrt{2}U_2\sin\omega t\,d\omega t = \frac{U_{0\max}}{\sqrt{3}}\left[1+\cos\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right] \quad \text{за } \alpha \ge \frac{\pi}{6}. \tag{1.39}$$

За активного характеру навантаження крива випрямленого струму $i_0(\omega t)$ повторює криву напруги $u_0(\omega t)$, регулювальні характеристики визначимо так:

$$\frac{U_0}{U_{0\max}} = \frac{I_0}{I_{0\max}} = \begin{cases}\cos\alpha & \text{за } \alpha \le 30^0;\\ 1+\cos(30^0+\alpha) & \text{за } \alpha \ge 30^0.\end{cases} \tag{1.40}$$

1.3.6 Особливості роботи трифазного однотактного керованого випрямляча на навантаження індуктивного характеру

При роботі трифазної схеми на навантаження індуктивного характеру струм через кожен тиристор тече одну третю частину періоду. Крива випрямленої напруги за кутів регулювання $\alpha \le 30^0$ є така сама (див. рис. 1.10), як і в разі роботи даної схеми на активне навантаження (див. рис. 1.9).

При $\alpha > 30^0$ у кривій випрямленої напруги виникає інтервал, коли випрямлена напруга $u_0(\omega t)$ змінює полярність, набираючи від'ємних значень. Оскільки індуктивність дроселя $\omega L >> R_н$, то в навантаженні тече постійний струм $i_0(\omega t) = I_0$. Кут регулювання α змінюється від **0** до **90^0**.

З метою зменшення пульсації випрямленої напруги й зменшення реактивної потужності, споживаної від мережі, а отже для оптимізування коефіцієнта потужності випрямляча, до схеми впроваджується додатковий діод ***VD1*** (див. рис. 1.6, *г* – його в технічній літературі називають – нульовий вентиль, зворотний діод, розрядний діод тощо). Він відкривається – переходить до відкритого провідного стану – за зміни полярності випрямленої напруги.

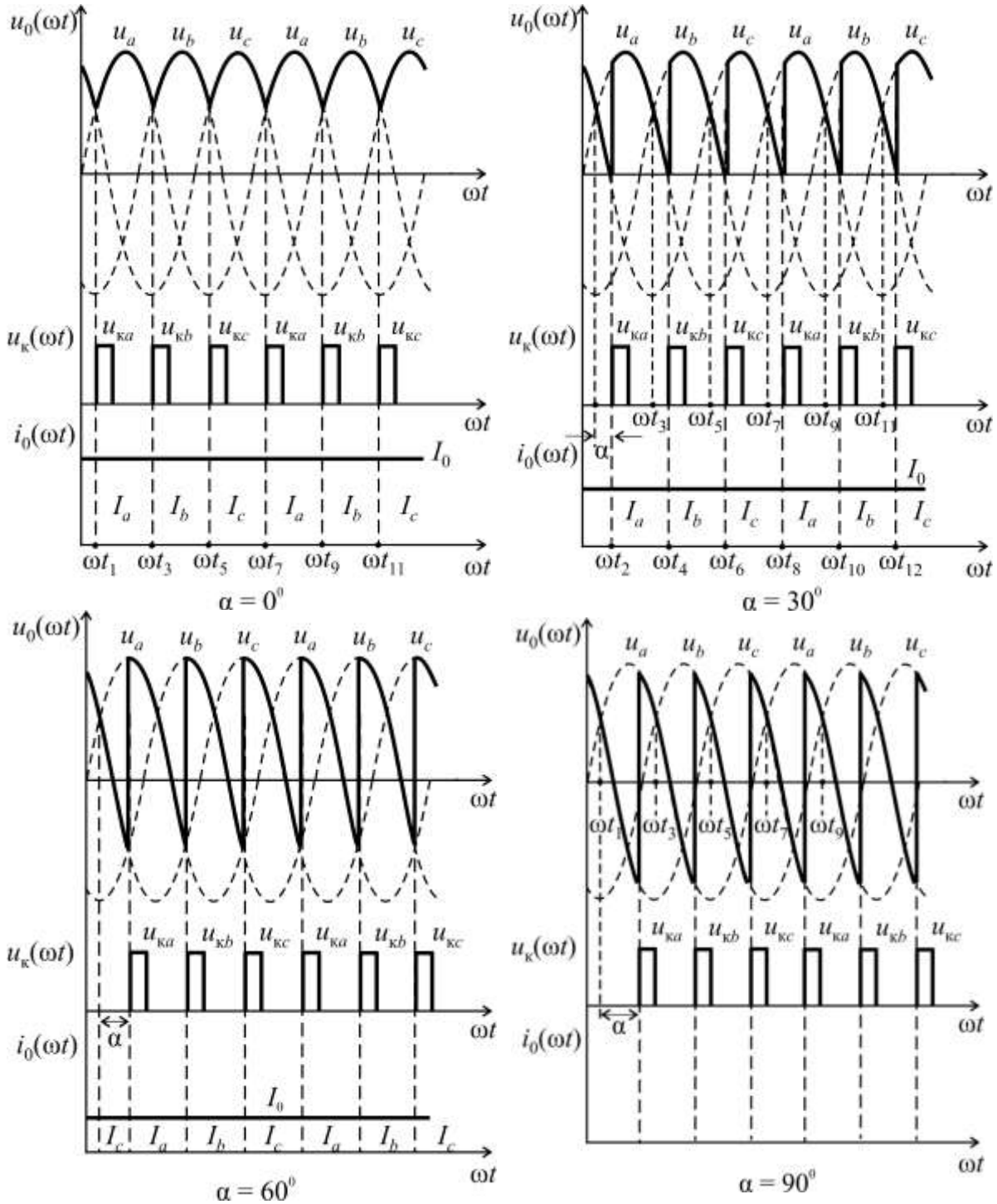


Рисунок 1.10 – Діаграми, які ілюструють електричні процеси трифазної схеми керованого випрямляча з індуктивним характером навантаження

Наявність додаткового діода ***VD1*** призводить до того, що основна гармоніка струму первинних обмоток трансформатора ***TV1*** стає зміщеною відносно напруги на кут **α/2.** За його відсутності зміщення фаз поміж струмом і напругою в первинному колі трансформатора становить кут **α.** З цього випливає, що впровадження до схеми керованого випрямляча додаткового діода призводить до збільшення коефіцієнта потужності.

МОДУЛЬ 2

2 ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

2.1 До дослідження перетворювачів постійної напруги із самозбудженням

Транзисторні перетворювачі постійної напруги із самозбудженням набули застосовування в багатьох областях техніки: в автоматиці, в аналогових та цифрових обчислювальних пристроях тощо. Вони виконують велику кількість функцій, наприклад задаючого генератора (автогенератора), який формує прямокутну напругу для керування силовими комутувальними транзисторами (чи тиристорами), чи то синхронізатора-формувача пилкоподібної напруги у складі пристрою керування. Використовуються ці перетворювачі також і як малопотужні інвертори чи то перетворювачі постійної напруги (низьковольтні й високовольтні).

2.1.1 Інвертор із самозбудженням. Загальні відомості. Особливості схемотехнічної реалізації

Уперше схема транзисторного інвертора з'явилася 1954 року. Її названо ім’ям винахідника Ройера (у різних джерелах зустрічаються інші варіанти перекладу прізвища: Роера, Роєра). Схема являє собою двотактний симетричний перетворювач із самозбудженням – автогенератор на транзисторах із трансформаторним виходом та магнітним зв'язком поміж входом і виходом (рис. 2.1).

Іноді дана схема зустрічається за назвою "магнітний мультивібратор". Керування транзисторами ***VT1***, ***VT2*** здійснюється за допомогою обмоток зворотного зв'язку ***W3, W4*** (які часто називають "базовими" обмотками), що забезпечують додатний зворотний зв'язок, розташовуючись разом з колекторними обмотками ***W1, W2*** **(*W1 = W2*)** на спільному осерді трансформатора ***TV1***. У квазівстановленому стані обмотки зворотного зв'язку (***W3, W4***) забезпечують закритий стан одного з транзисторів (він перебуває в режимі відсікання) і відкритий стан іншого (він перебуває в режимі насичення).

Виводи обмоток позначені крапкою, матимуть однакові знаки потенціалів в інтервалах півперіодів роботи автогенератора і синфазно їх змінювати після завершення півперіоду.

Осердя трансформатора автогенератора може виготовлятися з матеріалів із різною формою петлі гістерезису: непрямокутною чи прямокутною. Від форми петлі гістерезису залежить режим роботи автогенератора.

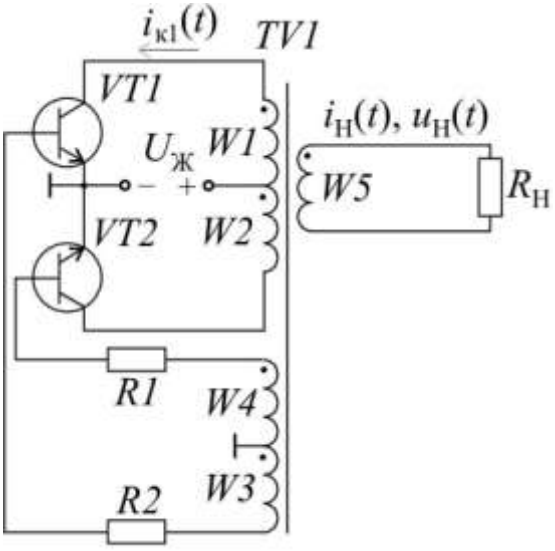


Рисунок 2.1 – Однофазний транзисторний інвертор із самозбудженням

За непрямокутної петлі гістерезису осердя трансформатора не насичується. Перемикання силових комутувальних транзисторів відбувається за досягнення струмом колектора відкритого транзистора максимального значення, яке залежить від струму бази й коефіцієнта підсилювання (передавання струму) транзистора.

За яскраво вираженої прямокутної петлі гістерезису перемикання силових транзисторів відбувається внаслідок насичення осердя трансформатора. При цьому максимальний магнітний потік повністю визначається індукцією насичення й перерізом осердя трансформатора. Чим вище ступінь прямокутності петлі гістерезису, тим більш постійний є у часі струм намагнічування.

Втрати на перемагнічування визначаються площею гістерезисної петлі, побудованої на координатах ***B***, ***H***. Площа петлі гістерезису є пропорційна до втрат в одиниці об'єму магнітного матеріалу за один період змінювання магнітного поля.

2.1.2 Робота інвертора з осердям з лінійною петлею гістерезису

Розглянемо особливості функціонування автогенератора (див. рис. 2.1) з трансформатором ***TV1***, у якого осердя має непрямокутну (лінійну) петлю гістерезису і при роботі не насичується.

Обмотки зворотного зв'язку ***W3, W4*** (базові обмотки) підімкнено в такий спосіб, що полярності е. р. с. зворотного зв'язку забезпечують на першому інтервалі відносно повільних електромагнітних процесів відкритий і насичений стан, наприклад транзистора ***VT1***, і повністю закритий непровідний стан транзистора ***VT2*** (він перебуває в режимі відсікання). При цьому напруга $\boldsymbol{U_ж}$ джерела первинного електроживлення практично, (якщо

знехтувати малим спаданням напруги $\Delta U_{\text{ке}}$ на насиченому колекторно-емітерному переході ***VT1),*** прикладається до колекторної обмотки ***W1***. Через обмотку ***W1*** протікає струм $i_1(t) = i_{\text{к1}}(t)$ (він же й струмом колектора транзистора ***VT1***). Цей струм є сумою струмів: $I'_{\text{б}} = I_{\text{б1}} W3/W1$, обумовлений струмом бази $I'_{\text{н}} = I_{\text{н}} W5/W1$ ($I_{\text{н}}$ – струм у колі навантаження), компенсує розмагнічуючу дію навантаження $R_{\text{н}}$ та i_0 намагнічування осердя трансформатора ***TV1*** (усі струми приведено до обвитків колекторної обмотки ***W1***). На розглянутому інтервалі часу перші дві складові струму $i_{\text{к1}}(t)$ є постійні, а $i_0(t)$ є змінним у часі.

Пропорційно до швидкості змінювання в часі струму $i_0(t)$ в індуктивності L_1 обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1*** індукується е. р. с. e_1, яка чисельно дорівнює напрузі $U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}}$, прикладеній до обмотки ***W1***:

$$L_1 \frac{di_0(\text{t})}{dt} = U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}}. \qquad 2.1)$$

Інтегруючи (2.1), дістанемо лінійний закон зміни струму $i_0(t)$:

$$i_0(t) = \frac{U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}}}{L_1} \int dt = \frac{(U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}})t}{L_1}. \qquad (2.2)$$

Відповідно до закону повного струму,

$$H_L = i_0 W1/l, \qquad (2.3)$$

де l – середня довжина шляху магнітного потоку в магнітопроводі.

Лінійне змінювання струму $i_0(t)$ призводить до аналогічного змінювання напруженості магнітного поля H (значення магнітної проникності матеріалу осердя вважаємо за постійне) відповідно й до лінійного змінювання індукції B та магнітного потоку Φ у магнітопроводі:

$$\Phi = BS = \mu HS, \qquad (2.4)$$

де S – площа перерізу, а μ – магнітна проникність магнітопроводу.

Відповідно до закону електромагнітної індукції

$$e_1 = -W1 \frac{d\Phi}{dt} = W1S \frac{dB}{dt}, \qquad (2.5)$$

лінійне змінювання Φ за $dB/dt = \text{const}$ призводить до появи на первинній ***W1*** і вторинній ***W5*** обмотках ***TV1*** е.р.с. постійної величини: $e_1 = \text{const}$, $e_5 = \text{const}$.

Для забезпечення режиму насичення силових комутувальних елементів – біполярних транзисторів – потрібен струм бази $I_{\text{бн}} = I_{\text{б1}} = I_{\text{б2}}$. Він має перевищувати струм $I_{\text{б гр}}$, що відповідає граничному режиму переходу до активної області (точка 1 на рис. 2.2) транзистора з мінімальним (найменшим) значенням коефіцієнта підсилення $h_{21\text{e min}}$. На практиці це забезпечується вибором коефіцієнта насичення $K_{\text{н min}} = I_{\text{бн}} h_{21\text{e min}} / I_{\text{кн}} = 1{,}2...1{,}3$. Через розкид параметрів ступінь насичення $K_{\text{н}}$ транзисторів буде різною. Вона буде максимальна для транзистора з більшим значенням $h_{21\text{e}}$:

$$K_{\text{н max}} = (K_{\text{н min}} h_{21\text{e max}})/h_{21\text{e min}}\ , \qquad (2.6)$$

де $K_{\text{н max}}$, $K_{\text{н min}}$ – відповідно максимальний і мінімальний коефіцієнти насичування транзисторів; $h_{21\text{ max}}$, $h_{21\text{ min}}$ – відповідно максимальний і мінімальний коефіцієнти підсилювання транзисторів.

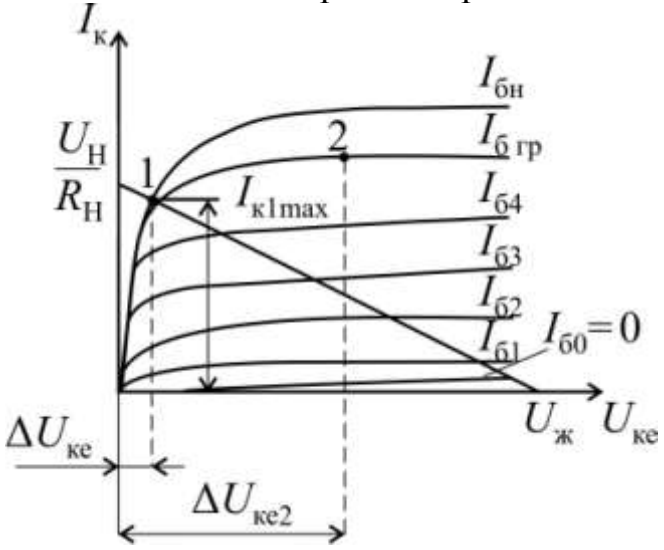


Рисунок 2.2 – Вихідні характеристики силових комутувальних транзисторів автогенератора за схемою рисунка 2.1

Враховуючи, що осердя трансформатора ***TV1*** не насичується, а $I_б$ = **const**, $I_к$ = **const**, змінювання струму $i_{к1}(t)$ повністю визначатиметься $i_0(t)$. Насичений стан транзистора ***VT1*** зберігатиметься до досягнення струмом $i_{к1}$ значення:

$$I_{к1\ max} = h_{21e} i_{б1} = h_{21e} \frac{n_{31} U_ж - \Delta U_{бe}}{R_1} = I_{кн} + I_{0\ max}, \qquad (2.7)$$

де $\Delta U_{бe} = U_{бe}$ – пряме спадання напруги на базо-емітерному переході ***VT1***; $I_{0\ max}$ – максимальне значення струму намагнічування $i_0(t)$, що відповідає виходу робочої точки транзистора з області насичення (точка 1 на рис. 2.2) до активної області (точка 2 на рис. 2.2).

Активний режим роботи біполярного транзистора характеризується збільшенням спадання напруги на ділянці колектор–емітер. Унаслідок цього зменшується напруга, прикладена до обмотки ***W1***, а отже, і швидкість наростання струму намагнічування $i_0(t)$. Це призводить до зменшення е.р.с. і на обмотці позитивного зворотного зв'язку ***W3***, оскільки подальше незначне зменшення струму колектора вже призводить до істотного зростання $U_{ке}$ ($U_{ке2} > U_{ке1} = \Delta U_{ке}$ – рис. 2.2). Струм $i_{б1}$ транзистора ***VT1*** розпочне зменшуватися, що призведе до ще більшого зростання напруги на транзисторі ***VT1***. Розпочинається лавиноподібний процес його закривання. Зниження струму $i_{к1}$ до значення меншого за i_0, спричинює появу е.р.с. самоіндукції протилежної полярності. Через це транзистор ***VT1*** переходить до закритого

непровідного стану, а ***VT2*** – до відкритого провідного стану – до режиму насичення.

На цьому – другому – інтервалі відносно швидких процесів перемикання ***VT1***, ***VT2*** струм намагнічування $i_0(t)$ не встигає істотно змінитися (див. рис. 2.3, *в*) через наявність індуктивності намагнічування трансфор-

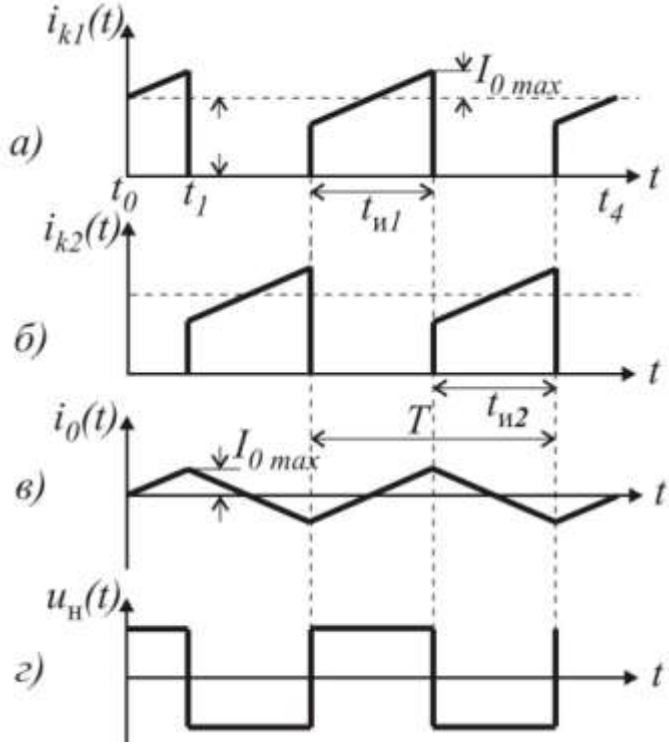


Рисунок 2.3 – Діаграми роботи автогенератора за схемою рис. 2.1

рматора ***TV1***, $i_0(t)$ зберігає своє значення $I_{0\,max}$ і напрямок протікання. Через це після переходу до відкритого провідного стану ***VT2*** з моменту t_1 через ***W2*** протікатиме струм $i_{к2}(t)$. Для його визначення скористаємося законом повного струму для трансформатора ***TV1***:

$$-i_{k1}W1 + i_{k2}W2 + i_{б1}W3 - i_{б2}W4 - i_нW5 = H_L. \qquad (2.8)$$

Враховуючи, що для розглянутого інтервалу часу струми бази $i_{б1}$ та колектора $i_{к1}$ транзистора ***VT1*** дорівнюють нулю, для струму колектора $i_{к2}$ транзистори ***VT2*** запишемо:

$$i_{к2}(t) = -K_{52}\frac{U_ж}{R_н} + K_{42}\frac{K_{42}U_ж - \Delta U_{бе}}{R_1} + \frac{H(t)I}{W2}, \qquad (2.9)$$

де $K_{52} = W5/W2$; $K_{42} = W4/W2$; $K_{51} = K_{52} = W5/W1$; $K_{42} = K_{41} = W4/W1$.

Припустімо, що плечі схеми автогенератора симетричні, тобто $K_{31} = K_{41}$, $L_1 = L_2 = L$, параметри транзисторів ***VT1***, ***VT2*** є ідентичні й $I_{к2\,max} = I_{к1\,max}$.

На відміну від t_0, коли $i_0(t) = 0$ у момент часу t_1, значення струму $i_0(t) = I_{0\,max}$, причому напрямок його протікання є протилежний до струму колектора $i_{к2}(t)$ транзистора ***VT2***. Оскільки швидкість змінювання струму

$i_0(t)$ на інтервалі $t_1 \ldots t_2$ є однакова зі швидкістю змінювання на інтервалі $t_0 \ldots t_1$, то тривалість t_{u12} інтервалу $t_1 \ldots t_2$ збільшиться удвічі порівняно з тривалістю t_{u01} інтервалу $t_0 \ldots t_1$. На підставі (2.2) запишемо:

$$2I_{0\max} = \frac{U_{ж} - \Delta U_{ке}}{L} t_{i12}, \tag{2.10}$$

звідки

$$t_i = t_{i12} = 2I_{0\ \max} L/(U_{ж} - \Delta U_{ке}). \tag{2.11}$$

У наступні інтервали часу $t_2 \ldots t_3$, $t_3 \ldots t_4$, ... відбуватимуться процеси, ідентичні до таких щодо інтервалу $t_1 \ldots t_2$. Тому період роботи автогенератора визначається як

$$T = 2t_{\text{i}} = 4I_{0\ \max} L/(U_{ж} - \Delta U_{ке}). \tag{2.12}$$

На інтервалі часу $t_1 \ldots t_2$ лінійному змінюванню струму $i_0(t)$ також відповідає лінійне змінювання магнітного потоку $\Phi_0(t)$ (рис. 2.3, *в*). У момент перемикання транзисторів t_1, t_2, ... похідна $d\Phi_0/dt$ змінює знак на протилежний, тому, відповідно до закону електромагнітної індукції, напруги на $W1 \ldots W5$ також змінюють полярність, залишаючись упродовж півперіодів незмінними за амплітудою:

$$U_1 = U_2 = U_{ж} - \Delta U_{ке} = -W1 d\Phi/dt = -SWdB/dt = -Ldi/dt_1. \tag{2.13}$$

Враховуючи, що, за означенням, індуктивність (чи коефіцієнт самоіндукції)

$$L = \Psi/i_0 = W1\,\Phi/i_0 = W1\,BS/i_0,, \tag{2.14}$$

для $I_{0\ \max}$ відповідають $B_{\ \max}$ і $\Phi_{\max}$ і

$$L = W1 B_{\max} S / I_{0\ \max}. \tag{2.15}$$

Підставивши (2.15) в (2.12), дістанемо

$$L = W1\,B_{max}\,S/I_{0\,max}\cdot. \tag{2.16}$$

Відповідно для частоти f та $U_1 = U_{ж} - \Delta U_{ке}$ запишемо:

$$f = 1/T = (U_{ж} - \Delta U_{ке})/4W1 B_{\max} S; \tag{2.17}$$

$$U_{ж} - \Delta U_{ке} = 4W1\ B_{\max} S. \tag{2.18}$$

Проведений аналіз ґрунтується на тому, що осердя трансформатора не насичується, крива намагнічування є лінійна, індуктивності L_1, L_2 є постійні й дорівнюють L. При цьому процеси комутації відбуваються за зменшення напруг U_1, U_2 на первинних півобмотках $W1$, $W2$ ($W1 = W2 = W$). Як виходить з (2.13), з урахуванням $dH/di_0 = W1/l$ та $i_0 = i_{к}$,

$$U_1 = U_2 \approx \frac{W^2 S}{I} \frac{dB}{dH} \frac{di_{к}}{dt} \tag{2.19}$$

Видно, що зменшення напруги на обмотках $W1$, $W2$ може відбуватися через зменшення приростів $di_{к}/dt$ чи dB/dH.

Вище було розглянуто перший випадок, коли через обмеженість підсилювальних властивостей транзисторів $VT1$, $VT2$ вони виходять до акти-

вної області роботи, де $di_к/dt \to 0$ і здійснюється процес комутації. Оскільки колекторний струм транзистора визначається параметрами схеми (див. рис. 2.1): струмом бази, коефіцієнтом підсилювання транзисторів, $\Delta U_{бе}$, $W1(W2)$, $W3(W4)$, напругою $U_ж$ його відхиленнями тощо, – то, внаслідок технологічного розкиду цих параметрів, виникає несиметрія у плечах схеми. Це призводить як до неоптимальної повторюваності частоти перетворювання пристрою від зразка до зразка при їхньому виготовлянні, так і до відхилення тривалостей півперіодів комутації.

2.1.3 Робота інвертора з осердям з прямокутною петлею гістерезису

Розглянемо випадок, коли автогенератор (див. рис. 2.1) виконано з трансформатором, у якого осердя має прямокутну форму петлі гістерезису.

З аналізу (2.19) бачимо, що зменшення U_1, U_2 є можливе й за $dB/dH \to 0$. Період T роботи схеми Ройера в цьому разі визначається часом руху робочої точки (магнітної індукції) осердя трансформатора граничною петлею перемагнічування, зображеною на рис. 2.4, *а*. При цьому магнітна індукція сягає значень, рівних індукції насичення, із заходом до області великих напруженостей магнітного поля.

Нехай у момент часу t_1 транзистор $VT1$ відкривається: початок процесу перемагнічування відповідає точці 1 (див. рис. 2.4). До півобмотки $W1$ прикладається постійна за величиною напруга. Струм $i_0(t)$ в обмотці $W1$ почне наростати до значення, що відповідає точці 2. Стан схеми підтримується відповідними полярностями напруг на обмотках $W1$, $W2$ зворотного зв'язку на переходах база–емітер транзисторів $VT1$, $VT2$. Робоча точка, що характеризує магнітний стан осердя, пересуватиметься до точки 3. При цьому напруженість H магнітного поля на ділянці 2...3 кривої $B(H)$ є приблизно постійна:

$$H \approx H_c, \tag{2.20}$$

де H_c – коерцитивна сила.

Для розглянутого стану $i_{б2} = 0$, $i_{к2} = 0$, а для струму $i_{к1}$ на підставі співвідношення (2.6), справедливе:

$$i_{к1}(t) = -K_{51}U_н/R_н + K_{31}(K_{31}U_ж - \Delta U_{бе})/R_1 - i_0(t). \tag{2.21}$$

Однак тут струм $i_0(t)$ практично не змінюється:

$$i_0(t) \approx I_0 = H_c l / W = \text{const}, \tag{2.22}$$

і тому при зміщені робочої точки осердя по ділянці 2...3 кривої $B(H)$ струм $i_{к1}$ є приблизно постійний:

$$i_{к1} \approx I_{кн} + I_0, \tag{2.23}$$

при цьому забезпечується умова

$$K_{31}(U_ж - \Delta U_{ке})/R_б > i_{к1}/h_{21}. \tag{2.24}$$

Такий стан у схемі зберігається аж до короткочасного насичення осердя трансформатора ***TV1***.

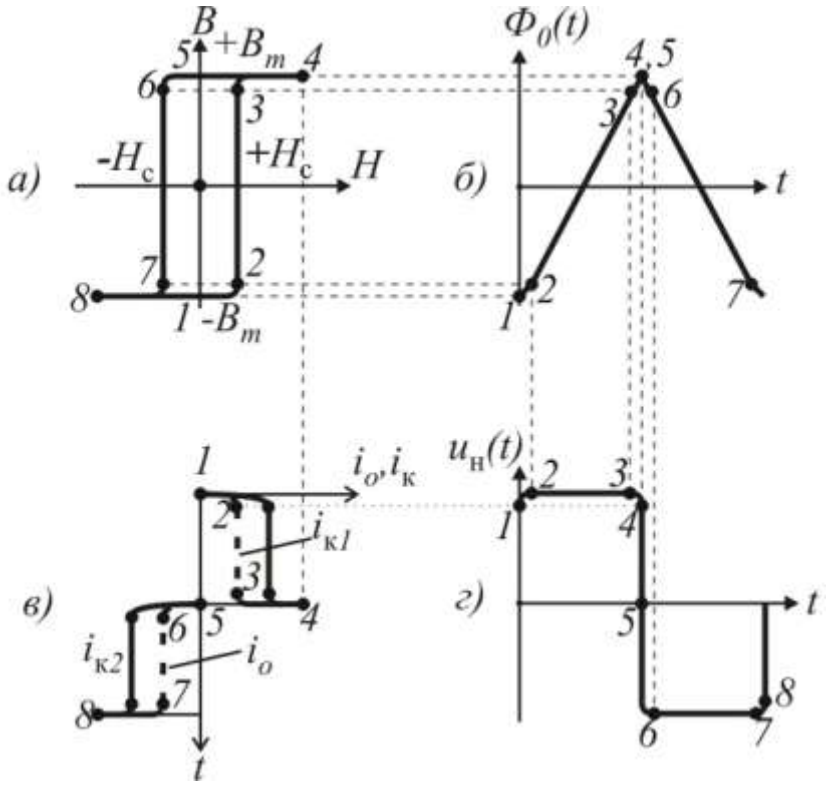


Рисунок 2.4 – До процесу роботи транзисторного інвертора за схемою рисунка 2.1

Цей процес розпочинається в точці 3. Насичення осердя призводить до збільшення модуля напруженості магнітного поля й, відповідно, струму i_0 намагнічування. Унаслідок цього струм $i_к$ колектора ***VT1*** різко зростає, наближаючись до струму короткого замикання джерела живлення $U_ж$. У момент часу t_4 струм $i_{к1}$ сягає максимального значення $I_{к1\ max}$, що відповідає межі насичення ***VT1***, зумовленого співвідношенням (2.7).

Далі транзистор ***VT1*** переходить до активної області, напруга колектор–емітер $U_{кe1}$ збільшується (перехід з точки 1 до точки 2 рис. 2.2), напруги на всіх обмотках трансформатора ***TV1*** зменшуються. Під впливом позитивного зворотнього зв'язку стан схеми зміниться на протилежний до вихідного: транзистор ***VT1*** закриється, а транзистор ***VT2*** відкриється й перейде до режиму насичення. При цьому полярності напруг на обмотках ***W1...W5*** зміняться на протилежні. Робоча точка зміститься з положення 4 у положення 5, 6. За наступного насичення трансформатора ***TV1*** (точки 7, 8 рис. 2.4) схема повернеться до початкового стану і т.д.

Змінювання магнітного потоку $\Phi(t)$ в осерді трансформатора (рис. 2.4, *б*) і напруга $u_н(t)$ на вторинній обмотці ***W5*** є аналогічні до відповідних кривих, наведених на рис. 2.3.

Як було зазначено вище, упродовж періоду роботи частину часу транзисторний ключовий елемент перебуває у стані насичення, коли він відкритий, і в стані відсікання – коли закритий. В обох цих станах біполярні транзистори мають гірші характеристики за керованості порівняно з активною областю.

Для переведення насиченого біполярного транзистора до активної області і потім до області відсікання потрібен певний кінцевий час, необхідний для розсмоктування неосновних носіїв заряду в області бази. Тільки після цього змінений сигнал керування зможе перевести силовий комутувальний елемент і пристрій перетворювання до іншого стану.

Межа області між режимами насичення й активним визначається рівністю струму колектора $I_{к\,м}$ й дорівнює добутку струму бази $I_б$ на коефіцієнт підсилювання h_{21e} за струмом транзистора у схемі зі спільним емітером:

$$I_{к\,м} = h_{21e} I_{б}. \tag{2.25}$$

На практиці використовувані елементи мають технологічний розкид коефіцієнта підсилювання. Тому мінімальний струм $I_{б\ min}$ обирається з умови забезпечення максимального колекторного струму $I_{к\,max}$ за мінімально можливого коефіцієнта підсилювання $h_{21e\ min}$. Окрім того, має бути закладено і певний запас задля впевненого, гарантованого насичення транзистора, який визначає ступінь насичення:

$$I_{б\,min} = \kappa_{нас} \frac{I_{к\,max}}{h_{21e\,min}} = \frac{I_{к\,max}}{h_{21e\,min}}. \tag{2.26}$$

Тому при використовуванні конкретного транзистора з технологічними розкидами $h_{21e\ min} \ldots h_{21e\ max}$ й $I_{б\ min} \ldots I_{б\ max}$ матимемо

$$\kappa_{н\ min} = h_{21e\ min} I_{б\,min} / I_{к\,max}; \tag{2.27}$$

$$\kappa_{н\ max} = h_{21e\ max} I_{б\,min} / I_{к\,max}. \tag{2.28}$$

Реальний $\kappa_н$ перебуватиме в межах

$$\kappa_{н\,min} \le \kappa_н \le \kappa_{н\,max}. \tag{2.29}$$

З урахуванням (2.26) та (2.27)

$$(1{,}2...1{,}3) \le \kappa_н \le (1{,}2...1{,}3) h_{21e\,max} / h_{21e\,min}. \tag{2.30}$$

Як наслідок час розсмоктування $\Delta t_р$ реального транзистора буде також різним:

$$\Delta t_{р\,min} \le \Delta t_р \le \Delta t_{р\,max}. \tag{2.31}$$

Швидкодія транзистора в активній області є велика, тому можна відокремити в роботі автогенератора Ройера інтервали часу $\Delta t_п$, коли відбувається перемагнічування магнітопроводу трансформатора, і $\Delta t_р$, коли відбувається розсмоктування неосновних носіїв в області бази насиченого транзистора.

Величина $\Delta t_{\text{п}}$ визначається тривалістю перемагнічування магнітопроводу трансформатора ***TV1*** від $B_{\min} \approx -B_m$ до $B_{\max} \approx B_m$ в одному півперіоді й від $+B_m$ до $-B_m$ – в іншому (див. рис. 2.4) під впливом $U_1 = -\mathbf{e}_1 = U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}}$.

Нехтуючи спаданням напруги на активному опорі первинних півобмоток ***W1***, ***W2***, для швидкості змінювання магнітної індукції можемо записати:

$$dB/dt = (U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}})/SW1. \tag{2.32}$$

Проінтегруємо (2.32) на інтервалі $\Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{р}}$:

$$\int_0^{\Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{р}}} (U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}})\, dt = W1S \int_{-B_m}^{+B_m} dB. \tag{2.33}$$

Після інтегрування (2.33) дістанемо

$$\Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{р}} = 2 B_{m1} S / (U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}}). \tag{2.34}$$

З огляду на те, що $\Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{р}} \approx T/2$, визначимо

$$f = 1/T = (U_{\text{ж}} - \Delta U_{\text{ке}})/4W1B_m S. \tag{2.35}$$

З аналізу (2.31), (2.34) і (2.35) бачимо, що технологічний розкид параметрів елементної бази призведе до асиметрії – нерівності часу відкритого й закритого станів транзисторів автогенератора й до відхилення частоти перетворювання від зразка до зразка після їхнього виготовлення.

До переваги автогенератора Ройера слід віднести простоту схеми. Однак його широке використовування обмежується через низку недоліків.

Внаслідок насичення магнітопроводу різко спадає індуктивність контура намагнічування трансформатора, збільшуються струм відкритого транзистора, динамічні втрати в осерді трансформатора й колах колектора транзисторів, має місце й високий рівень завад. Схема є критична до технологічного розкиду параметрів елементної бази, змінювання температури, напруги $U_{\text{ж}}$ джерела первинного живлення. З їхнім змінюванням змінюється й частота перетворювання (через вплив як на індукцію насичення магнітопроводу трансформатора, так і на спадання напруги $\Delta U_{\text{ке}}$ на колекторно-емітерному переході силових комутувальних транзисторів). Ці недоліки, а також неоптимальне використовування транзисторів за струмом колектора, низький к. к. д. за високих частот перетворювання обмежують застосовування автогенераторів Ройера за перетвореною потужністю величиною не більше за **10...20 ВА**.

Побудову силової частини схеми автогенераторів може бути виконано за всіма відомими схемами однофазних двотактних інверторів незалежно від форми петлі гістерезису, матеріалу осердя трансформатора. Принцип дії всіх автогенераторів, у тому числі мостового й напівмостового, є однаковий. Наведені на рис. 2.3 й 2.4 діаграми для схеми однофазного двотактного автогенератора (див. рис. 2.1) будуть рівною мірою притаманні й

для всіх інших типів однофазних транзисторних інверторів з вихідною напругою прямокутної форми. Тому обмежимося розгляданням роботи лише найпростішої схеми рис. 2.1, викладеним вище.

Часові діаграми струмів і напруг, що ілюструють роботу однофазних інверторів із самозбудженням, з вихідною напругою прямокутної форми при навантаженні активного й індуктивного характеру цілковито збігаються з діаграмами відповідно, зображеними на рис. 2.3. Пояснюється це тим, що характер повільних електромагнітних процесів, пов'язаних з обміном електричною енергією, поміж джерелом електроживлення й навантаженням, в інверторах із самозбудженням є цілковито ідентичний до характеру тих самих процесів в інверторах із зовнішнім збудженням. Розходження у способах формування сигналів керування пристроєм керування та їх вплив на вхідні кола силових комутувальних транзисторів позначаються лише на розходженні характеру протікання процесів у інтервалах комутації транзисторів.

2.2 До дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів)

Імпульсні перетворювачі постійної напруги характеризуються високими значеннями к.к.д., масогабаритних показників та надійністю роботи. Вони використовуються в тих випадках, коли треба перетворити параметри електричної енергії з вихідною напругою джерела електроживлення на інші параметри, потрібні для навантаження. При цьому виникають завдання узгодження напруг як за рівнем, так і за полярністю.

2.2.1 Імпульсний принцип перетворювання електричної енергії

Перетворювачі, досліджувані в даній роботі, використовуються в різних вузлах апаратури зв'язку, обчислювальної апаратури та ін. Одним з прикладів їхнього використовування є материнські плати сучасних ЕОМ, де напруга основного джерела живлення +5 В перетворюється на напругу, необхідну для нормальної роботи процесора, яка становить, залежно від моделі процесора, 1,8…3,6 В. Там використовується перетворювач знижуючого типу потужністю 25…150 Вт. Вихідна напруга дискретно регулюється за допомогою спеціалізованої мікросхеми пристроя керування, який має цифровий інтерфейс зв'язку з BIOS материнської плати.

Імпульсні перетворювачі електричної енергії постійної напруги (струму) характеризуються роботою силових комутувальних елементів у режимі перемикань.

Найпростішим прикладом імпульсного методу перетворювання електричної енергії постійного струму є періодичне підмикання навантаження до первинного джерела електроживлення через ключовий елемент – пе-

реривач ***S1*** (рис.2.5 *а*). При цьому на виході ключа ***S1*** формуються імпульси напруги прямокутної форми (рис. 2.5, *б*). Час замкнутого t_i й розімкненого t_P станів ключа ***S1*** можна автоматично змінювати, впливаючи на нього сигналами з виходу пристрою керування ***ПК***. Якщо знехтувати спаданням напруги на ключі ***S1*** та з'єднувальних проводах, то в інтервалах часу t_i, коли ключ ***S1*** замкнено, миттєва напруга на навантаженні дорівнює напрузі $U_ж$ джерела живлення, а в інтервалі t_P, коли ключ розімкнено, напруга на навантаженні дорівнює нулю (рис. 2.5, *б*).

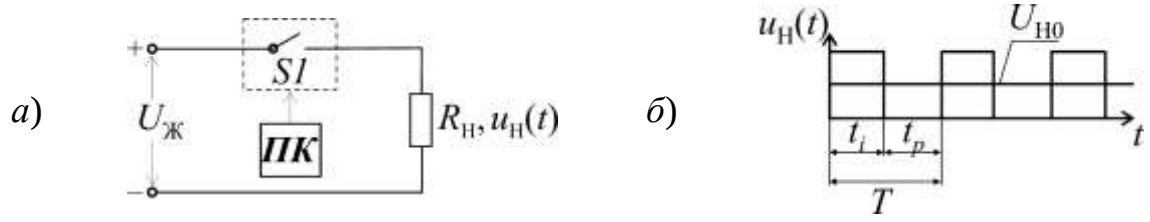


Рисунок 2.5 – Функціональна схема імпульсного перетворювача електричної енергії послідовного типу (*а*) і часова діаграма вихідної напруги $u_н(t)$ (*б*)

Середнє значення напруги $U_{н0}$ на навантаженні залежатиме від співвідношення часу замкненого й розімкненого станів ключа:

$$U_{ж0} = \frac{1}{T}\int_0^{t_i} U_ж dt = U_ж \frac{t_i}{T} = U_ж к_з = U_ж t_i f = U_ж / Q\,, \qquad (2.36)$$

де f, T – частота й період відповідно перемикання ключа ***S1***; $к_з = t_i / T$ – коефіцієнт заповнювання імпульсів; $Q = T / t_i$ – щілинність роботи ключа.

Рівень вихідної напруги $U_{н0}$ можна змінювати шляхом зміни щілинності $Q = T / t_i = 1 / к_з$. Цей процес можна розглядати як модуляцію вихідної напруги $U_ж$ ключем ***S1***:

- широтно-імпульсна модуляція (***ШІМ***) відповідає випадкові, коли час t_i – змінний, а період T – постійний;
- частотно-імпульсна модуляція (***ЧІМ***) відповідає випадкові, коли час t_i – постійний, а період T – змінний;
- широтно-частотно-імпульсна модуляція відповідає випадкові, коли час t_i й період T – змінні.

Напруга після ключового елемента ***S1*** у схемах рис. 2.5 й 2.6 носить явно виражений імпульсний характер. Для зменшення змінної складової напруги чи струму в імпульсних перетворювачах встановлюють фільтри, які складаються з реактивних елементів – індуктивностей та ємностей. Вмикання дроселя послідовно з навантаженням чи конденсатора паралельно, до нього призводить до штучного змінювання характеру навантаження з активного на індуктивний, чи ємнісний. При цьому розглянуті вище схеми трансформуються на схеми безпосередніх перетворювачів постійної напруги.

2.2.2 Однотактні імпульсні перетворювачі знижувального, підвищувального та інвертувального типів

Безпосередні перетворювачі постійної напруги виконують свої функції за одноразового перетворення електроенергії. Сьогодні є відомі й широко використовуються три основних типи цих перетворювачів – регуляторів постійної напруги (***РН***). Визначальною класифікаційною ознакою розглянутих перетворювачів є наявність гальванічного зв'язку поміж входом і виходом.

Три найпростіших способи одноразового перетворення електричної енергії здійснюються у схемах трьох основних типів (***y***) (рис. 2.6.). Наявність періодичної комутації в колі між джерелом електроживлення та навантаженням потребує впровадження додаткових реактивних елементів для накопичення, зберігання й передавання енергії до навантаження. Регулювання та стабілізація напруги (струму) навантаження здійснюється зміною в тривалості відкритого й закритого станів ключа ***S1*** у силовій схемі перетворювача – силовому каналі ***СК***.

S1 – силовий ключ; $\boldsymbol{I_н}$ – середнє значення струму навантаження; ***ПК*** – пристрій керування; $\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***

Рисунок 2.6 – Імпульсні перетворювачі електричної енергії:
а – знижувальний (***y*** **= 1**), *б* – підвищувальний (***y*** **= 2**) та *в* – інвертувальний (***y*** **=3**)

Схеми рис. 2.6 називають перетворювачами знижувального (***y*** **= 1**), підвищувального (***y*** **= 2**) та інвертувального (***y*** **= 3**) типів, або, відповідно, регуляторами ***I***, ***II***, ***III*** типів (***РНІ***, ***РНІІ***, ***РНІІІ***). Регулятори містять однакову кількість однотипних елементів, які у різні способи увімкнено стосовно навантаження і джерела первинного електроживлення. У їхньому функціонуванні мають місце такі відмінності: імпульсне споживання енергії від джерела електроживлення й неперервне передавання енергії до навантаження ***РНІ*** (за неперервного струму силового дроселя), неперервне споживання електричної енергії від джерела електроживлення й імпульсне передавання електроенергії до навантаження в ***РНІІ***, імпульсне споживання й передача електроенергії в навантаження в ***РНІІІ***. Рівні середнього зна-

чення вихідної напруги $U_н$ регуляторів визначаються через рівень вхідної напруги $U_ж$ за допомогою коефіцієнта заповнювання $к_з$ (відносної тривалості провідного стану ключа):

для ***РНІ*** $$U_н = U_ж к_з; \quad (2.37)$$

для ***РНІІ*** $$U_н = U_ж/(1-к_з); \quad (2.38)$$

для ***РНІІІ*** $$U_н = U_ж к_з/(1-к_з). \quad (2.39)$$

Ці вирази носять назву регулювальних характеристик. Параметром регулювання є $к_з$.

Регулювальні характеристики **РНІ, РНІІ** та **РНІІІ** наведено на рис. 2.7. Криві ***1*** відповідають режиму неперервного струму силового дроселя, криві ***2, 3*** – переривчастому – розривному. Пристрої **РНІІ** і **РНІІІ**, порівнянно з ***РНІ***, характеризуються істотно гіршими показниками: значно більшими габаритами й масою дроселя й конденсатора, більшим внутрішнім опором, гіршим використанням за струмом комутувального ключа ***S1*** і рекуперацiйного діода ***VD1***. Окрім того, пульсації вихідної напруги ***РНІІ***

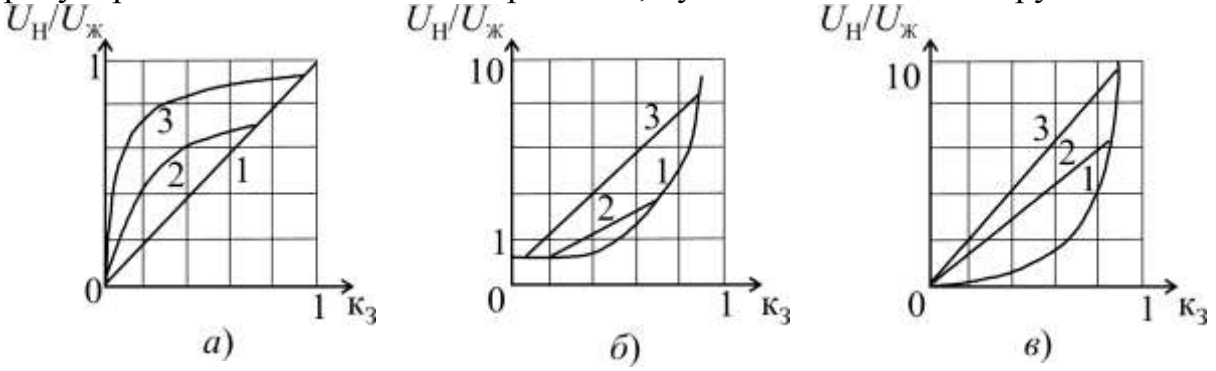


Рисунок 2.7 – Регулювальні характеристики перетворювачів електричної енергії: а – знижувального (***y* = 1**), *б* – підвищувального (***y* = 2**) та *в* – інвертувального (***y* = 3**) типів

та ***РНІІІ*** є пропорційні до струму навантаження й не залежать від індуктивності дроселя фільтра. Для досягнення такого самого рівня пульсацій вихідної напруги у схемі перетворювача ***РНІ*** потрібен конденсатор значно меншої ємності. Що стосується характеру комутаційних процесів при відкриванні й закриванні силових комутувальних ключів ***S1*** та діодів у всіх трьох схемах – ***РНІ***, ***РНІІ***, ***РНІІІ*** – то вони є цілковито ідентичні.

У схемі рисунка 2.6, *а* дросель ***L1*** бере участь у згладжуванні змінної напруги, яка надходить на вхід фільтра. Це дозволяє здобути мінімально можливі значення імпульсного й ефективного струму, що протікає через конденсатор $C_н$, та мінімальний за об'ємом і масою силовий згладжувальний фільтр.

Схему рис. 2.6, *а* доцільно використовувати за необхідності зниження напруги джерела живлення за струмів навантаження до кількох десятків

амперів, схему рис. 2.6, *б* – там, де потрібно підвищити рівень вихідної напруги (порівняно з вхідною), а схему рис. 2.6, *в* –для змінювання полярності вихідної напруги (стосовно вхідної).

Принципові схеми перетворювачів знижувального, підвищувального та інвертувального типів з використовуванням у якості силових ключів ***S1*** транзисторів ***VT1*** наведено на рис. 2.8.

У всіх трьох схемах рис. 2.8 забезпечується періодичне підмикання дроселя ***L1*** до джерела живлення за допомогою транзистора ***VT1*** і до навантаження за допомогою діода ***VD1***, які відіграють роль електронних ключів. Конденсатор ***C1*** згладжує пульсацію перетвореної напруги.

Характеристики перетворювачів залежать від режиму роботи накопичувального дроселя ***L1***. Розрізнюють три режими роботи: неперервний, граничний і переривчастий (рис. 2.10). Для зменшення масогабаритних показників доцільно зменшувати індуктивність дроселя ***L1***, але це призводить до переривчастого режиму, за якого різко зростають пульсації струмів в елементах і колах перетворювачів.

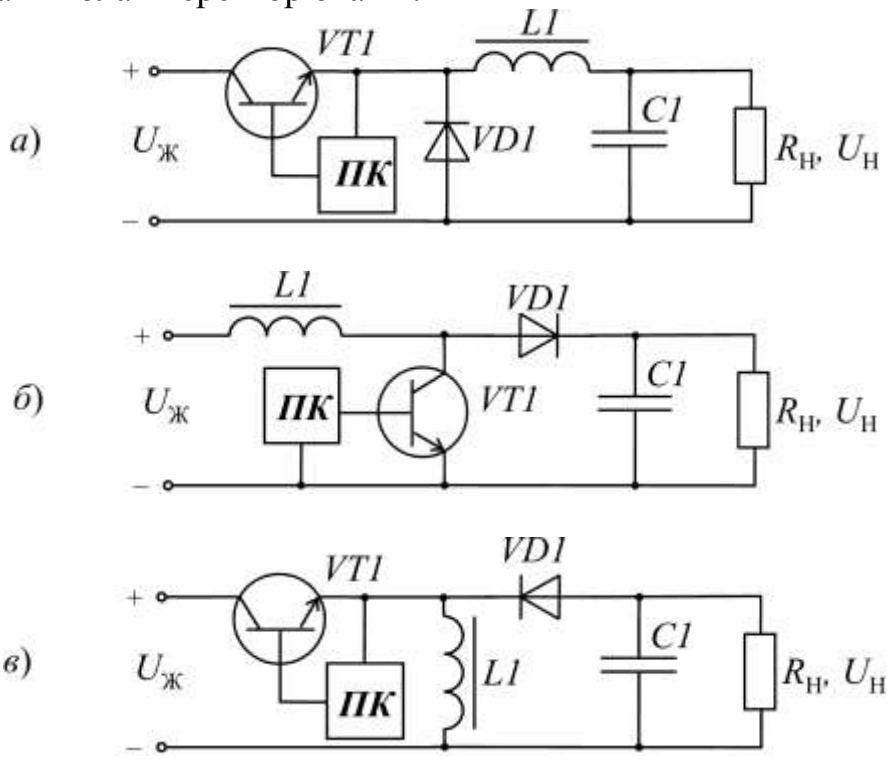


Рисунок 2.8 – Принципові схеми перетворювачів а – знижувального (а), підвищувального (б), та інвертувального (в) типа

2.2.3 Особливості функціонування однотактних імпульсних перетворювачів

Період ***T*** роботи перетворювача можна розділити на три інтервали: накопичення $t_н$, повернення $t_{пов}$ та паузи $t_п$. Як протікають струми у перетворювачах на даних інтервалах, показано на рис. 2.9, відповідно для зни-

жувального (***y* = 1**) (рис. 2.9, *а*), підвищувального (***y* = 2**) (рис. 2.9, *б*) інвертувального (***y* = 3**) (рис 2.9, *в*).

На інтервалі $t_н$ накопичення електричної енергії дроселем ***L1*** вихідний сигнал пристрою керування ***ПК*** забезпечує відкритий провідний стан транзистора ***VT1***. Транзистор перебуває у стані насичення, тому спадання напруги на ньому є незначне і транзистор ***VT1*** виконує функції замкненого ключа. Діод ***VD1*** при цьому перебуває у закритому непровідному стані, до катода стосовно анода прикладено позитивний потенціал (прикладено зворотну напругу) і струм через нього практично не протікає. Струм через дросель лінійно зростає, сягаючи наприкінці даного інтервалу максимального значення. При цьому в дроселі накопичується магнітна енергія.

На початку інтервалу повернення пристрій керування ***ПК*** закриває транзистор ***VT1*** – переводить у закритий непровідний стан і його струм

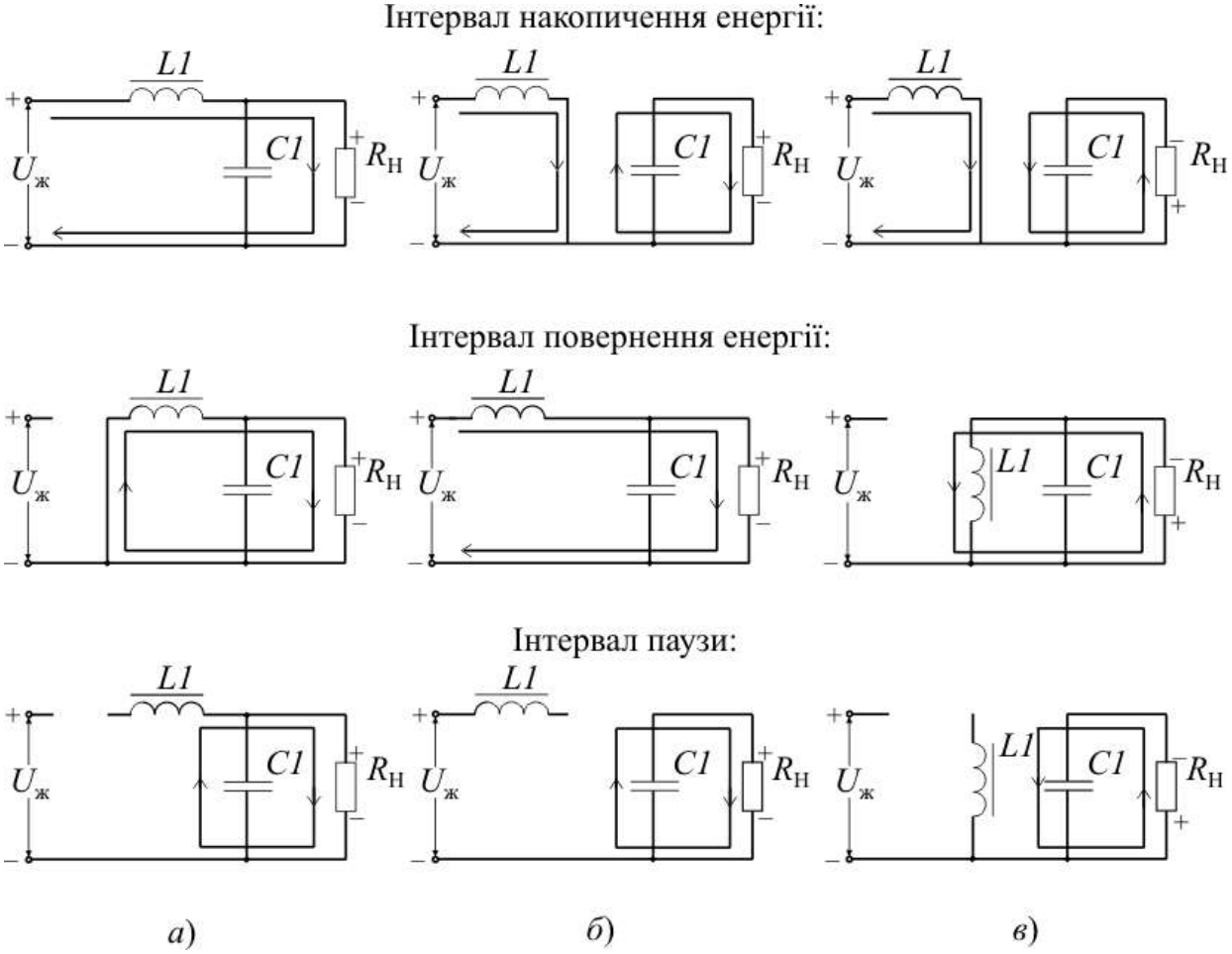


Рисунок 2.9 – До принципу роботи перетворювачів

стає рівним нулю. Енергія, накопичена в дроселі ***L1***, призводить до появи на його виводах е. р. с., що прагне підтримувати струм у ньому незмінним. При цьому діод ***VD1*** переходить у відкритий провідний стан і розпочинає проводити струм. На цьому інтервалі струм дроселя лінійно зменшується.

Енергія, накопичена у дроселі, передається до навантаження – забезпечується повернення енергії, накопиченої дроселем ***L1*** на інтервалі $t_н$.

Кількість накопиченої в дроселі ***L1*** енергії здатна певний час підтримувати у ньому струм. Якщо цей інтервал $t_{пов}$ є менше за $T - t_н$, тоді упродовж часу $t_п = T - t_н - t_{пов}$ струм через дросель ***L1*** не протікає. Даний інтервал часу відповідає стану паузи. Навантаження при цьому одержує електричну енергію від конденсатора ***C1*** (див. рис. 2.9).

Характер електричних процесів у перетворювачах відображає рис. 2.10 (знижувальний – рис. 2.10, *а*; підвищувальний – рис. 2.10, *б*; інвертувальний – рис. 2.10, *в*).

В якості електричного ключ ***VT1*** використовують потужні високочастотні біполярні, ***IGBT*** або ***МОН*** транзистори. В якості електричного

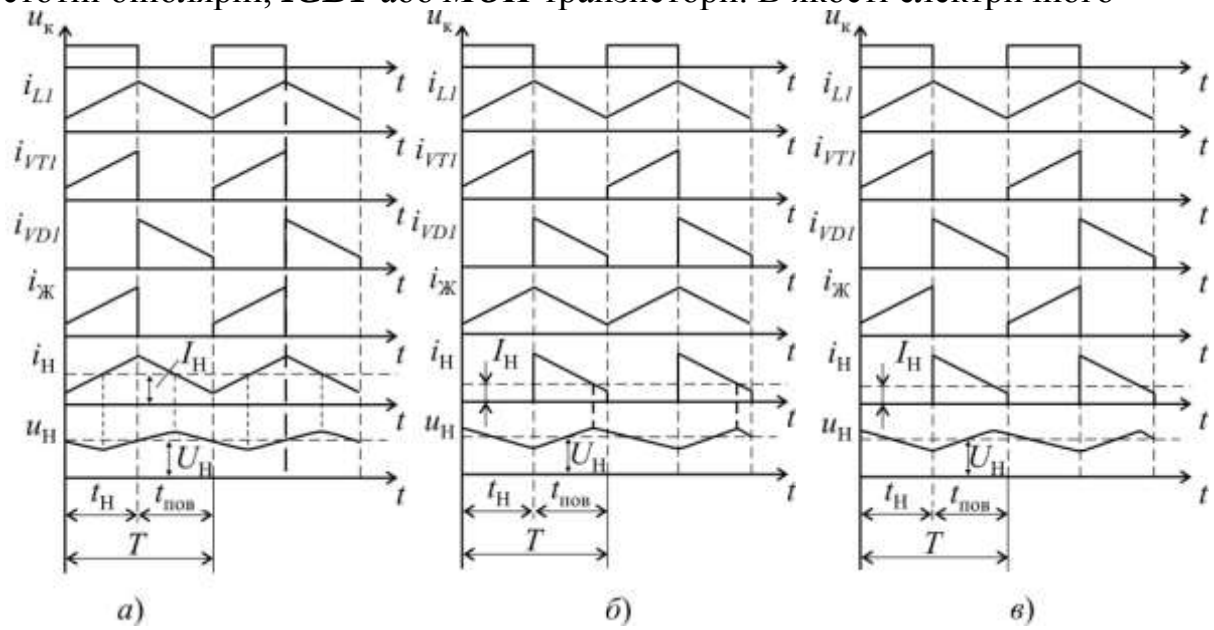


Рисунок 2.10 – Діаграми роботи перетворювачів *а* – знижувального, *б* – підвищувального, *в* – інвертувального

ключ ***VD1*** використовують потужні високочастотні діоди. За значних струмів на низьких напругах перетворювання для цієї мити використовують діоди з дифузією золота або діоди Шоттткі. Їхні функції можуть виконувати також біполярні або ***МОН*** транзистори, але це ускладнює пристрій керування (рис. 2.11).

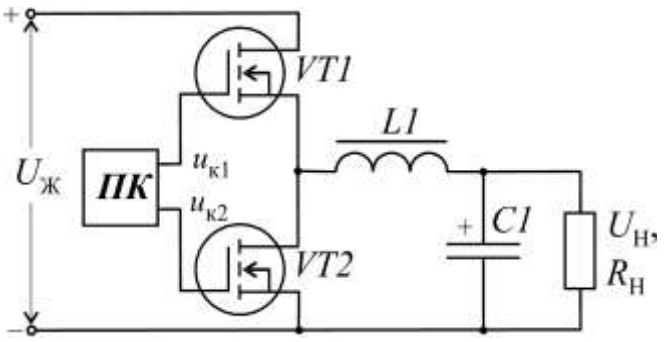


Рисунок 2.11 – Знижувальний перетворювач з транзистором ***VT2*** замість діода

2.3 До дослідження півмостового перетворювача постійної напруги

2.3.1 Перетворювачі постійної напруги. Стислі відомості

Під напівпровідниковими перетворювачами постійної напруги розуміють пристрої, які перетворюють постійну напругу певного номіналу на постійну напругу іншого номіналу, на напівпровідникових елементах.

Перетворювачі постійної напруги широко застосовуються у пристроях та системах електроживлення, які працюють від акумуляторних батарей та інших джерел постійного струму.

Перетворювачі постійної напруги є складовою частиною електронних систем різноманітного призначення (стаціонарних та бортових).

З метою здобуття доволі високого к. к. д. у перетворювачах постійної напруги використовується імпульсний режим роботи.

За найпростішого способу одноразового перетворення постійної напруги ефективно з високим к.к.д. та відносно простою схемотехнічною реалізацією пристроїв реалізовуються функції перетворювання електричної енергії.

Періодична комутація в колі поміж джерелом електроживлення та навантаженням потребує впровадження додаткових реактивних елементів. За імпульсного принципу перетворювання електричної енергії мінімальна кількість функціонально необхідних елементів містить широко використовувані напівпровідникові перетворювачі знижувального, підвищувального й інвертувального типів.

Основним недоліком, що обмежує область використовування перетворювачів знижувального, підвищувального й інвертувального типів, є відсутність гальванічної розв'язки навантаження та джерела електроживлення. До того ж такі перетворювачі мають низький коефіцієнт використовування силових комутувальних елементів якщо вихідна напруга багаторазово перевершує вхідну чи є значно нижче. У цих випадках на транзисторах та діодах виникають неприпустимо високі напруги, та через них проходять надмірні струми,

У випадках, коли потрібен гальванічний розподіл вхідних та вихідних кіл перетворювачів, використовуються більш складні схеми. Серед низки таких схем перетворювачів виокремимо дві, найбільш широко використовувані.

Одна зі схем утворюється послідовним з'єднанням найпростішого перетворювача (знижувального, підвищувального чи інвертувального типу) і нерегульованого перетворювача постійної напруги. Найпростіший перетворювач здійснює функції регулювання й, за потреби, стабілізації напруги в колах навантаження. Нерегульований перетворювач забезпечує

функції гальванічного розподілу вхідних та вихідних кіл і змінювання рівнів вихідних напруг за допомогою трансформатора.

Друга схема перетворювача містить регульований перетворювач, в якому зазначені вище функції сполучено. Гальванічний розподіл вхідних кіл перетворювача досягається за рахунок використовування трансформатора.

Трансформатор є одним з основних функціональних вузлів у пристроях перетворювання електричної енергії (і однофазних і багатофазних). Трансформатор забезпечує можливість змінювання рівня вихідної напруги стосовно вхідної, гальванічної розв'язки вхідних і вихідних кіл, а також одночасного здобуття кількох вихідних напруг. Для роботи трансформатора потрібне виконання певних умов. Струм $i_1(t)$ у первинній обмотці $W1$ і створювана ним магніторушійна сила $F = W1i_1(t)$ повинні створювати змінний магнітний потік Φ, змінюваний у часі. Лише у такому разі можливе індукування в обмотках трансформатора електрорушійних сил $e_1, e_2, \ldots, e_n$ відповідно до закону електромагнітної індукції

$$e_i = -W_i d\Phi/dt, \qquad (2.40)$$

де $i = 1, 2, \ldots, n$; n – кількість обмоток трансформатора.

Оскільки перетворенню піддається електрична енергія постійного струму, виникає одна з основних проблем: для нормального функціонування трансформатора необхідно забезпечити в осерді магнітопроводу змінний магнітний потік. Це завдання розв’язується за допомогою силових комутувальних елементів. Залежно від режиму й алгоритму роботи (формованих пристроєм керування) на обмотці W_i трансформатора формується змінна напруга прямокутної, трапецоїдної, східчастої або синусоїдної форми. Однак енергетично вигідно, щоби силові комутувальні елементи працювали в режимі перемикань, стрибкоподібно змінюючи полярність напруги первинної обмотки трансформатора. Енергетичні втрати у перетворювачі в цьому разі будуть найменшими, а к.к.д. – найбільшим. При цьому можливо сполучення функцій перетворювання й регулювання потоку електричної енергії від джерела електроживлення до споживача. Досягається це шляхом змінювання тривалості замкненого й розімкненого станів ключових елементів.

Двотактні перетворювачі постійної напруги силової частини також містять послідовно сполучені інвертор та випрямляч зі згладжувальним фільтром. У перебігу перетворювання електричної енергії здійснюється послідовне дворазове перетворювання електричної енергії: постійного струму на змінний з напругою прямокутної чи то непрямокутної форми з послідовним його перетворенням на постійний струм. Дані перетворювачі належать до дволанкових перетворювачів постійної напруги (з ланкою підвищеної частоти ***ЛПЧ*** – інвертором і ланкою постійного струму ***ЛПС*** – випрямлячем).

У якості ***ЛПС*** може бути використано кожну з відомих схем двотактних інверторів (із самозбудженням, зовнішнім збудженням та ін.).

Найбільш широкого розповсюдження набули перетворювачі постійної напруги на базі двотактних схем інверторів (рис. 2.12): з виведенням середньої точки трансформатора (а), мостової (б) і півмостової (в).

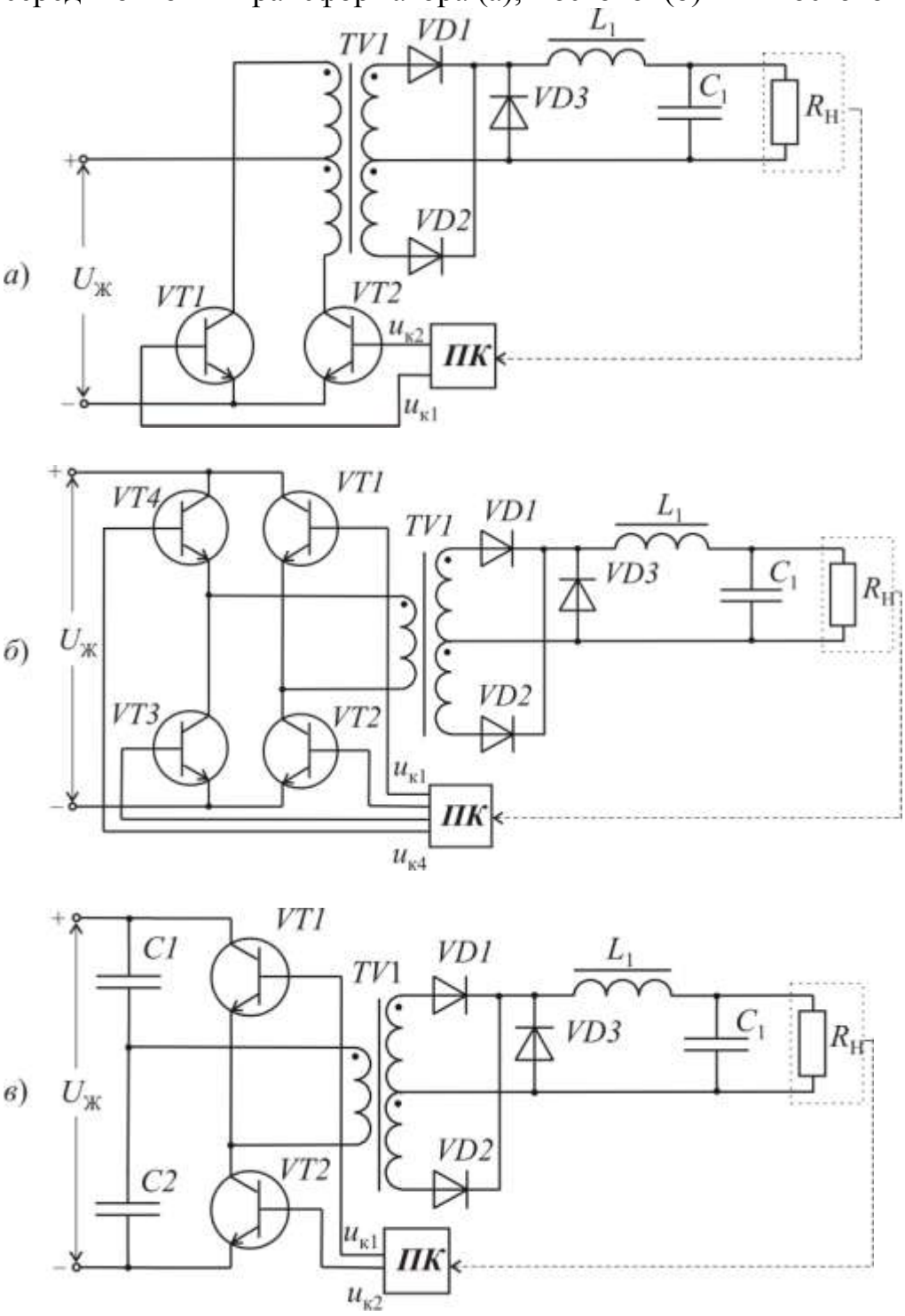


Рисунок 2.12 – Двотактні перетворювачі постійної напруги а – з введенням середньої точки трансформатора, б – мостової, в – півмостової

Регулювання проходження потоку електричної енергії з первинного джерела живлення до навантаження досягається змінюванням відносної тривалості відкритого й закритого станів силових транзисторів. Тривалості увімкненого стану силових комутувальних транзисторів у кожному напівперіоді повинні бути однакові. У противному разі у магнітопроводі трансформатора виникає постійний потік підмагнічування, що може призвести до насичення магнітопроводу й різкого збільшення струмів силових комутувальних елементів одного з плечей перетворювача.

Схеми рис. 2.12 слід розглядати як сполучення двох однотактних перетворювачів постійної напруги з прямим вмиканням діода, які працюють з зсувом у часі на половину періоду.

Інвертори із зовнішнім збудженням складаються з двох функціональних вузлів: силового каскаду – власне інвертора, який перетворює електричну енергію джерела електроживлення, і зовнішнього задавального генератора, пристрою керування ***ПК***, який формує алгоритм перемикання силових комутувальних елементів інвертора. Інвертор тут є
підсилювачем сигналу, який надходить з виходу задавального генератора (пристрою керування ***ПК***), тому часто в літературі він зустрічається за назвою "підсилювач потужності". Задавальний генератор може виконуватися за однією зі схем інверторів із самозбудженням або з використанням спеціально призначених для цих цілей мікросхем – контролерів із заданим алгоритмом керування. Як ключові елементи в інверторах може бути використано чи то транзистори чи тиристори.

Отже, перетворювачі постійної напруги із зовнішнім збудженням може бути подано сполученням зовнішнього задавального генератора – пристрою керування й силового каналу – підсилювача потужності з вихідним випрямлячем.

2.3.2 Двотактний півмостовий перетворювач. Особливості побудови та функціонування

Пристрій керування ***ПК*** формує керувальні сигнали, які визначають моменти відкривання й закривання силових комутувальних транзисторів.

Розглянемо схему двотактного півмостового перетворювача постійної напруги, зображену на рис. 2.13. Перетворювач складається із силової частини: інвертор (ємнісний подільник – ***C1, C2***, силові комутувальні елементи ***VT1, VT2*** і силовий високочастотний трансформатор ***TV1***), мостовий випрямляч (***VD1***…***VD4***), Г-подібний згладжувальний фільтр ***(L1, C3***), а також пристрій (схему) керування ***ПК*** транзисторами ***VT1, VT2.***

Трансформатор ***TV1*** виконує функції перетворювання рівня змінної напруги й гальванічну розв'язку вхідних та вихідних кіл.

Пристрій керування ***ПК*** виконує функції малопотужного задавального (синхронізувального) генератора, який формує сигнали керування $u_{к1}(t)$ та $u_{к2}(t)$ із заданими (потрібними) частотою й тривалістю.

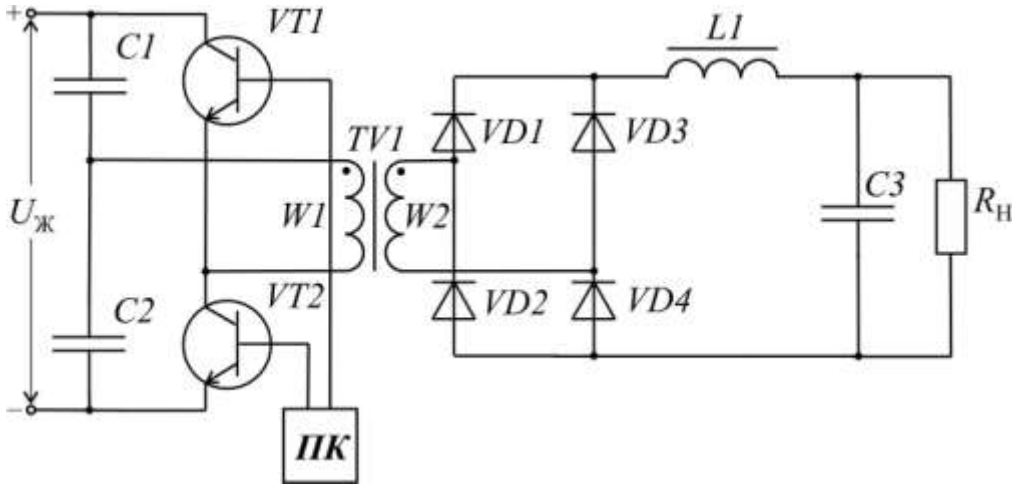


Рисунок 2.13 – Півмостовий перетворювач

На відміну від схеми перетворювача постійної напруги із самозбудженням (наприклад схеми автогенератора Ройера – магнітного мультивібратора), у схемі рис. 2.13 силова частина перетворювача функціонує в режимі підсилювача потужності сигналів керування $u_{к1}(t)$ та $u_{к2}(t)$, формованих малопотужним пристроєм керування ***ПК***. Дана схема використовується переважно за напруг живлення $U_ж$ понад **100 В** та потужностей перетворювання **100…500 Вт.** Так, наприклад, на базі даної схеми виконано джерела живлення персональних комп'ютерів формату AT та ATX. Напруга $U_ж$ живлення в них становить **310 В**, вихідні напруги $U_н$ **– ±5, ±12 В**, потужність $P_н$ у колі навантаження – **150…350 Вт.** Пристрій керування побудований на базі спеціалізованої мікросхеми TL494.

Розглянемо роботу даної схеми. Напруга $U_ж$ живлення подається на ємнісний подільник напруги (конденсатори ***C1***, ***C2***). Транзистори ***VT1***, ***VT2***, керовані пристроєм керування ***ПК***, почергово підмикають один з виводів (наприклад перший) первинної обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1*** до різних полюсів джерела живлення. Другий вивід первинної обмотки підімкнено до середньої точки сполучення конденсаторів ***C1***, ***C2***. Отже, до первинної обмотки ***W1*** трансформатора ***TV*1** підводиться змінна напруга прямокутної форми з амплітудою, рівною половині напруги $U_ж$ живлення. Це надає можливість використовувати у перетворювачі транзистори ***VT1***, ***VT2*** з меншим значенням максимально припустимої напруги $U_{ке\ max}$ колектор–емітер порівняно з іншими схемами перетворювачів (наприклад зі схемою з виводом середньої точки трансформатора). Максимальна напруга поміж колектором й емітером транзисторів ***VT1***, ***VT2*** приблизно дорівнює напрузі живлення $U_ж$ (для порівняння: у схемах з виводом середньої точки трансформатора $U_{ке\ max}$ сягає значення $2U_ж$).

Форма напруги на вторинній обмотці ***W2*** трансформатора ***TV*1** повторює форму напруги первинної, але відрізнюється амплітудою, яка змінюється на величину коефіцієнта трансформації $к_{тр} = W2/W1$. Змінна на-

пруга вторинної обмотки випрямлюється діодами ***VD1…VD4***. Пульсації випрямленої напруги згладжуються фільтром, утвореним елементами ***L1, C3***.

Середнє значення випрямленої напруги можна регулювати за допомогою пристрою керування ***ПК***, змінюючи коефіцієнт заповнювання $\mathbf{к_з}$ імпульсів керування. Коефіцієнт заповнювання – це відносна тривалість відкритого стану ключів ***VT1*** та ***VT2*** відповідно в інтервалах t_{VT1} та t_{VT2} стосовно періоду перетворювання:

$$\mathbf{к_з} = \frac{t_{VT1} + t_{VT2}}{T}. \qquad (2.41)$$

Форми струмів колекторних кіл транзисторів ***VT1, VT2,*** обмоток трансформатора ***W1, W2***, діодів випрямляча ***VD1…VD4***, а також струму, споживаного від джерела живлення, залежать від режиму роботи дроселя згладжувального фільтра ***L1***. При цьому виокремлюють три режими роботи дроселя: неперервний, граничний і перервний.

Режим роботи дроселя зумовлюється значеннями коефіцієнта заповнення, індуктивності ***L1*** та опору навантаження. Діаграми роботи перетворювача за різних режимів роботи дроселя зображено на рис. 2.14.

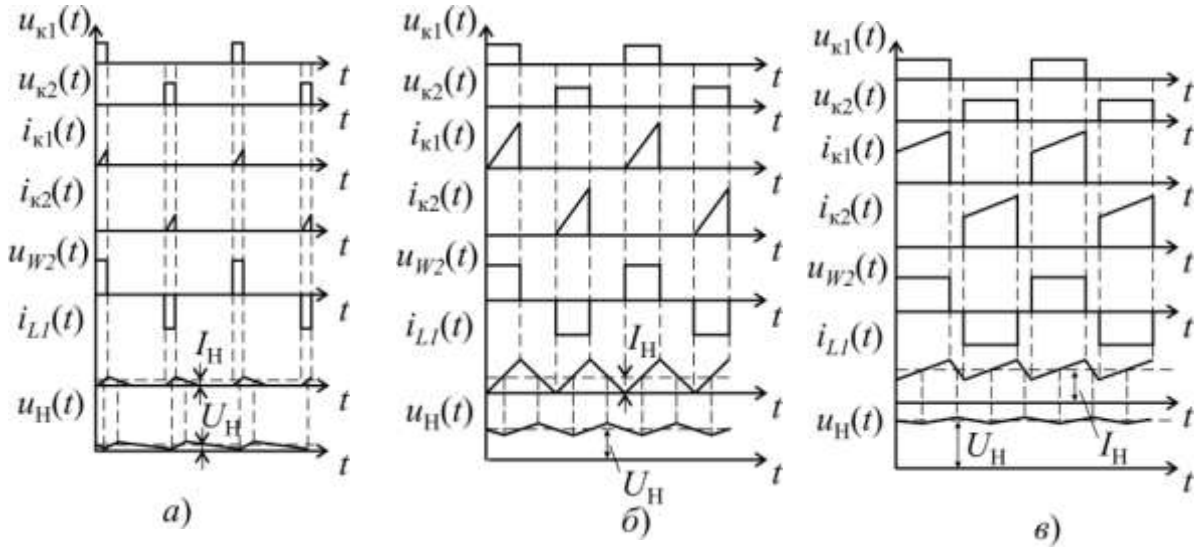


Рисунок 2.14 –Діаграми, які ілюструють електричні процеси у півмостовому перетворювачі: *а* – неперервний, *б* – граничний та *в* – переривний

Пристрій керування ***ПК*** забезпечує надійне відкривання й закривання електронних ключів ***VT1, VT2*** і регулювання коефіцієнта $\mathbf{к_з}$ заповнювання. Як правило, пристрій керування виконується на базі спеціалізованих мікросхем. Частота перетворювання сучасних перетворювачів досягає 3 МГц. Типове значення частоти перетворення найпоширеніших перетворювачів перебуває в межах 25…400 кГц. В якості електронних ключів

VT1, VT2 використовують біполярні транзистори, польові транзистори **MOSFET**, а також біполярні транзистори з ізольованим затвором **IGBT**. Як діоди ***VD1…VD4*** за високих частот перетворювання (понад 10 кГц) використовують діоди з бар'єром Шотткі.

2.4 До дослідження тиристорного інвертора

2.4.1 Інвертори. Загальні відомості. Класифікація

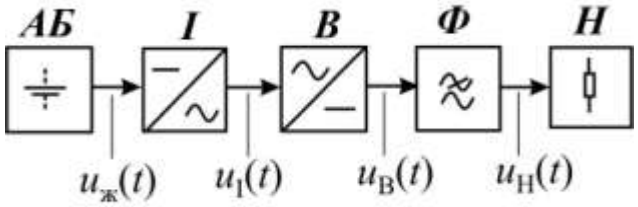
Під *інвертуванням* розуміється процес перетворювання електричної енергії постійного струму на змінний за заданих вихідної напруги (струму) та частоти. Уперше цей термін було використано для позначання *процесу, зворотного до випрямляння*. Інвертування використовувалося для зміни напрямку потоку електричної енергії. При інвертуванні енергія спрямовувалася від джерела постійного струму до мережі змінного струму. Пристрої, які здійснюють таке перетворювання електричної енергії, дістали назву інверторів. При цьому частота роботи інвертора визначалася частотою мережі. Потім термін "*інвертор*" у перетворювальній техніці поширився на всі типи статичних перетворювачів електричної енергії постійного струму на енергію змінного струму.

Інвертори набули застосовування у багатьох областях, наприклад для живлення споживачів змінного струму від акумуляторної батареї, для живлення бортової апаратури чи для забезпечення безперебійного електропостачання апаратури зв'язку при аварії в мережі змінного струму. В електроприводі інвертор забезпечує регульовані напругу й частоту.

У перетворювачах напруги постійного (рис. 2.15) або змінного (рис. 2.16) струму на напругу постійного струму іншого рівня інвертор є проміжною ланкою високої частоти змінної напруги.

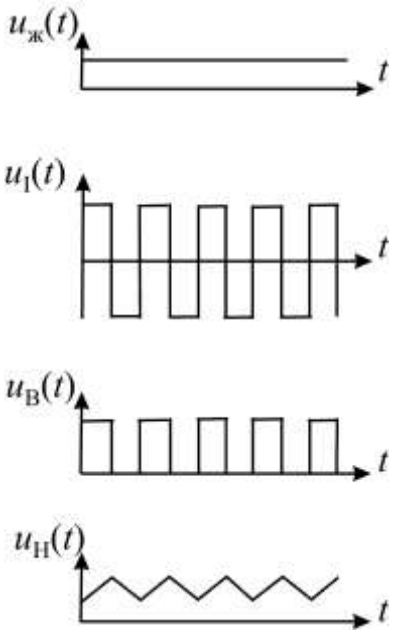
У системах електропостачання постійного струму при передаванні електричної енергії на далекі відстані інвертор стоїть на приймальному кінці лінії електропостачання для перетворювання постійного струму на змінний струм, потрібний споживачеві.

Інвертори широко використовуються й для перетворювання трифазного струму промислової частоти 50 Гц на однофазний й (чи) трифазний струм підвищеної частоти 100, 200, 400 Гц, необхідний для роботи машин підвищеної частоти, які мають меншу масу й більш оптимальні електричні характеристики. Окрім того, струм високої частоти широко використовується в технологічних цілях (в електрохімії, електронно-іонній технології тощо). Для перетворення електричної енергії джерел низької напруги (МГД-генераторів, паливних елементів, термо – і фотоелектричних генераторів) також використовується інвертор.



АБ – акумуляторна батарея;
І – інвертор;
В – випрямляч;
Ф – фільтр;
Н – навантаження (пристрій апаратури зв'язку)

а)



б)

Рисунок 2.15– Функціональна схема перетворювача постійної напруги (струму) (*а*) і часові діаграми напруг (*б*), які ілюструють її роботу

Для класифікування інверторів використовують такі ознаки: характер електромагнітних процесів, які протікають у схемі, спосіб комутування силових комутаційних елементів (тиристорів, транзисторів) або схеми їхнього вмикання – схемотехнічну реалізацію (конфігурацію) силової частини. Рідше використовуються й інші, менш істотні ознаки, наприклад спосіб регулювання вихідної напруги, принципи формування сигналів керування й узгодження силової частини інвертора з пристроєм керування й т. ін.

Залежно від кількості вихідних кіл змінного струму інвертори поділяються на *одноканальні* (з одним виходом) і *багатоканальні* (із двома й більше виходами).

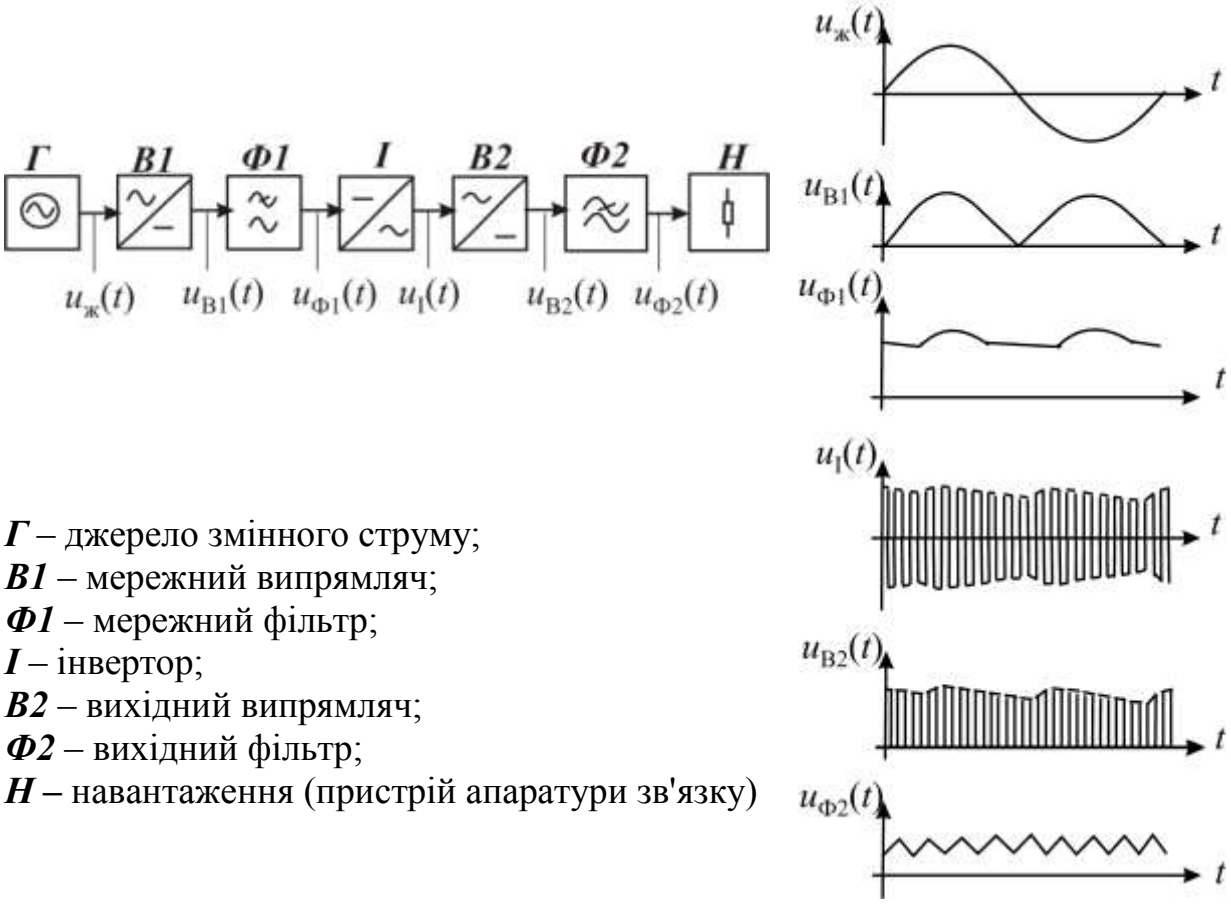
Залежно від схемотехнічної реалізації інвертори поділяють на *однофазні* й *багатофазні*, *однотактні* й *двотактні* (з відведенням середньої точки трансформатора, мостові, півмостові).

За типом використовуваної елементної бази силових комутувальних ключів відокремлюють *транзисторні* й *тиристорні* інвертори.

За способом керування розрізняють інвертори із *самозбудженням* (автогенератори) і *незалежним* (зовнішнім) *збудженням* (підсилювачі потужності).

Залежно від форми вихідної напруги інвертори поділяють на *інвертори з вихідною напругою прямокутної форми* й *інвертори з вихідною напругою синусоїдної форми*.

Наявність чи то відсутність трансформатора дозволяє поділити інвертори на *інвертори із трансформаторним та безтрансформаторним виходом*.



Г – джерело змінного струму;
В1 – мережний випрямляч;
Ф1 – мережний фільтр;
І – інвертор;
В2 – вихідний випрямляч;
Ф2 – вихідний фільтр;
Н – навантаження (пристрій апаратури зв'язку)

а) *б*)

Рисунок 2.16 – Функціональна схема перетворювача постійної напруги (*а*) і діаграми напруг (*б*), які ілюструють її роботу

Розрізняють інвертори, *ведені мережею* (їх називають залежними від мережі), і *автономні* (незалежні) інвертори.

У автономних інверторів схемотехнічна реалізація силової частини й схеми керування, режим їхньої роботи визначають вихідні параметри – форму, амплітуду й частоту вихідної напруги.

У інверторів, ведених мережею, такі вихідні параметри, як частота й напруга, залежать від параметрів мережі. Відзначимо, що схемотехнічна реалізація залежних інверторів практично не відрізняється від схем керованих випрямлячів.

Інвертори, ведені мережею, мають вихідні параметри на стороні змінного струму (частоту, напругу), що залежать від параметрів мережі. Схемотехнічна реалізація залежних інверторів практично не відрізняється від схем керованих випрямлячів. Наприклад, керовані випрямлячі часто працюють у реверсивному режимі, що являє собою поєднання традиційного випрямляння та інвертування, коли електрична енергія постійного струму перетворюється на електричну енергію змінного струму. У такому разі перетворювач і називають інвертором, веденим мережею.

Автономні інвертори – пристрої, які здійснюють перетворювання електричної енергії постійного струму на змінний з постійною чи регульованою $f_н = var$ частотою.

На відміну від залежних інверторів, ведених мережею, у автономних інверторів схемотехнічна реалізація силової частини та пристроя керування, режими їхньої роботи визначають їхні вихідні параметри – форму, амплітуду й частоту вихідної напруги.

2.4.2 Принципи побудови та функціонування інверторів

Залежно від характеру електромагнітних процесів, які протікають у схемі, автономні інвертори поділяються на інвертори струму, інвертори напруги й резонансні інвертори.

У загальному випадку у складі силової частини автономного інвертора можна виокремити: вхідний фільтр ***Ф1***, вихідний фільтр ***Ф2***, силові комутувальні елементи ***СКЕ*** й трансформатор ***Тр*** (рис. 2.17).

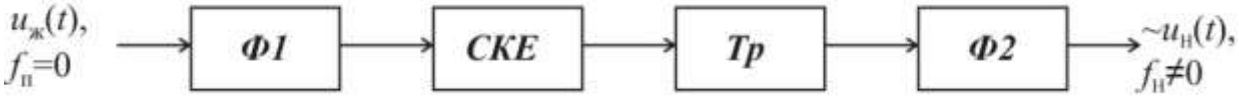
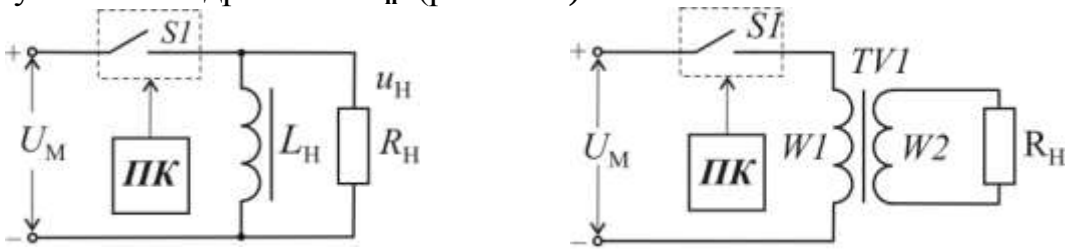


Рисунок 2.17– Функціональна схема інвертора

Однофазні однотактні інвертори можуть бути реалізовані в такий спосіб.

Перетворення постійного струму в змінний (інвертування) можна здійснити шляхом періодичного переривання кола живлення навантаження, шунтованого дроселем $L_н$ (рис. 2.18).



а) *б*)

Рисунок 2.18 – Однофазні однотактні схеми інверторів

Коли ключ ***S1*** перебуває у відкритому провідному стані, до навантаження та дроселя прикладається напруга $U_ж = U_м$ й у дроселі накопичується реактивна енергія. Коли ключ ***S1*** переходить у закритий провідний стан, накопичена енергія передається в навантаження $R_н$, формуючи імпульси напруги зворотної полярності. Періодичне відкривання й закривання ключа ***S1*** формує в навантаженні змінну напругу $u_н(t)$ (рис. 2.19, *а*). Форма вихідної напруги тут відрізняється від прямокутної тим більше, чим більше є опір навантаження $R_н$ і менше індуктивність дроселя $L_н$.

Струм i_{S1} ключа $S1$ на інтервалі часу $0 < t < 0{,}5T$ є струмом $i_ж$, споживаним з мережі, і визначається сумою струмів дроселя $L_н$ та навантаження $R_н$:

$$i_{S1} = i_ж = i_1 + i_ж = U_ж t/L_н + U_ж/R_н . \qquad (2.42)$$

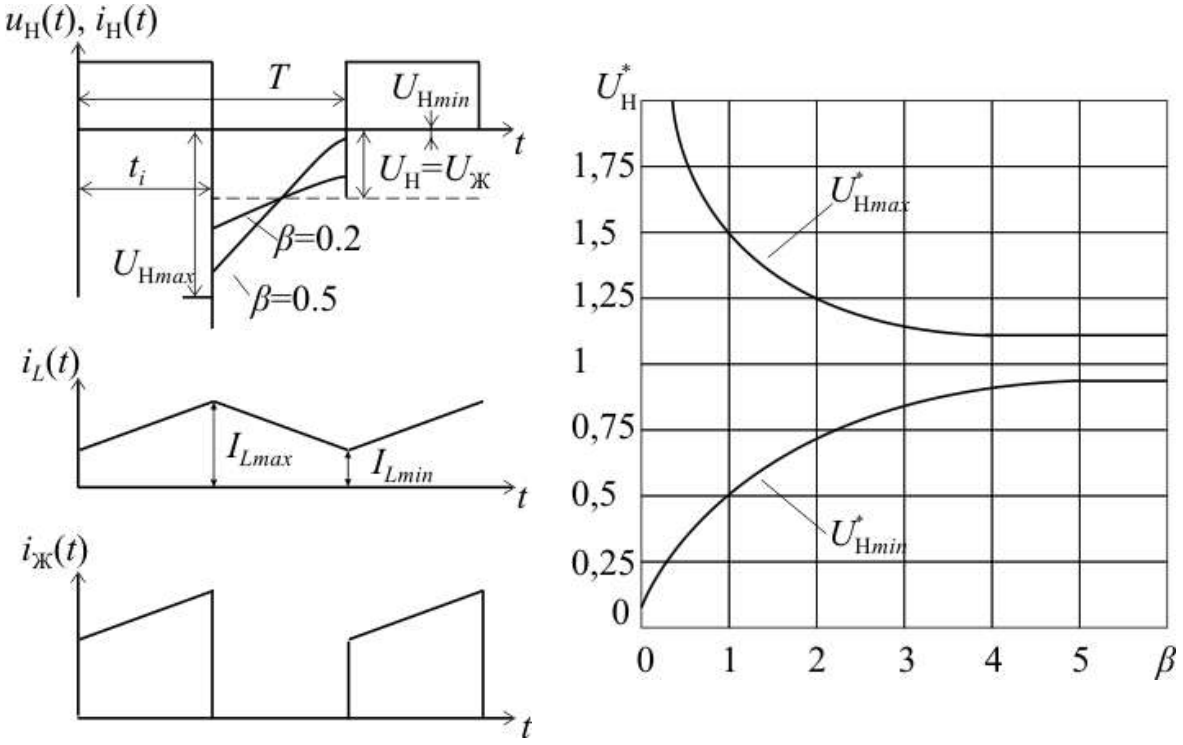


Рисунок 2.19 – Діаграми напруг і струмів, які ілюструють особливості функціонування інвертора рисунка 2.18

Враховуючи, що середня за період напруга на дроселі у сталому режимі дорівнює нулю, середнє значення напруги на навантаженні на інтервалі $T/2 < t < T$ дорівнює середньому значенню напруги на інтервалі $0 < t << T/2$, яка дорівнює $U_ж$. Залежно від значення індуктивності дроселя L вихідна напруга на навантаженні на інтервалі $T/2 < t < T$ матиме різний нахил. Чим менше коефіцієнт навантаження $\beta = 2L_н/TR_н$, тим більше максимальна напруга на навантаженні $U_{н\ max}$ за $t = t_i$ відрізняється від мінімального значення $U_{н\ min}$ за $t = T$.(див. рис. 2.19,*а*) $U_{н\ max} = i(t_i)\ R_н = I_{L\ max}\ R_н$.

Аналіз залежностей $U^*_{н\ max} = U_{н\ max}/U_ж$, $U^*_{н\ min} = U_{н\ min}/U_ж$ свідчить (див. рис. 2.18), що форма вихідної напруги на інтервалі $T/2 < t < T$ починає різко відрізнятися від прямокутної за $\beta \le 2$. Зауважимо, що β залежить і від $L_н$ і від $R_н$, а це обмежує діапазон змінювання опору навантаження за умов сталості величини $L_н$.

За відносно великої індуктивності дроселя $L_н$ ($L_н \to \infty$) пульсація струму в дроселі прямуватиме до нуля й $I_{L\ max} \approx I_{L\ min} \approx I_н$ (див. рис. 2.18). При цьому максимальний струм I_{S1m} ключа $S1$ буде $I_{S1m} = 2I_н$, а максимальна напруга на закритому ключі $S1$ $U_{S1m} = 2U_ж$.

В разі потреби гальванічного розподілу вхідних та вихідних кіл інвертора чи змінювання співвідношення напруг цих кіл дросель $L_н$ може бути виконано у вигляді трансформатора (див. рис. 2.18, *б*).

Однотактна схема півмостового інвертора забезпечує прямокутну симетричну по півперіодах форму напруги на навантаженні (рис. 2.20). Пристрій керування ***ПК*** синхронно керує ключами ***S1, S2.*** Тривалість їхнього відкритого стану дорівнює половині періоду ***T.*** За одночасно відкритих ключів ***S1, S2*** до навантаження $R_н$ та дроселя $L_н$ прикладається напруга $U_ж$ джерела живлення (діоди ***VD1, VD2*** при цьому закриті й не впливають на процеси у схемі). Струм $i_ж(t)$, споживаний від джерела електроживлення, дорівнює струмові $i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$, що протікає через ключі ***S1, S2***, визначається струмами $i_н(t)$ – навантаження $R_н$ й $i_L(t)$ – дроселя $L_н$:

$$i_ж(t) = i_{s1}(t) = i_{s2}(t) = i_н(t) + i_L(t) \quad \text{за} \quad 0 < t < 0{,}5T, \tag{2.43}$$

де

$$i_н(t) = U_ж/R_н; \quad i_L(t) = U_ж t/L. \tag{2.44}$$

На інтервалі часу $0{,}5T < t < T$, коли ключі ***S1*** та ***S2*** є закриті, енергія, накопичена в дроселі $L_н$, повертається через діоди ***VD1, VD2*** до джерела електроживлення (якщо за джерело електроживлення використовується випрямляч, то слід використати на вході інвертора ємність $C_{вх}$). Оскільки середнє значення напруги на дроселі $L_н$ за період роботи інвертора дорівнює нулю й забезпечується закон неперервності протікання струму дроселя $i_L(t)$, струм діода $i_д(t)$ до кінця періоду T зменшується до нуля (див. рис. 2.20, *б)*:

$$i_L(t) = i_н(t) + i_д(t) \quad \text{за} \quad 0{,}5T < t < T. \tag{2.45}$$

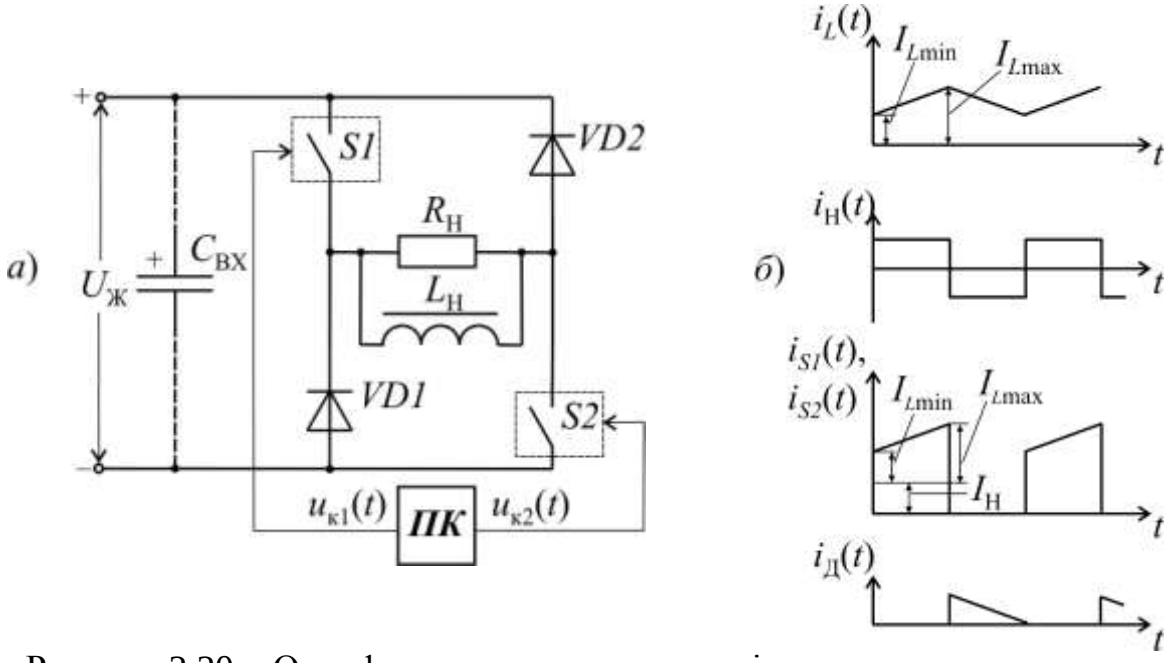


Рисунок 2.20 – Однофазна однотактна схема інвертора з прямокутною симетричною формою вихідної напруги (*а*) і часові діаграми струмів (*б*), які ілюструють роботу схеми

Нескладно визначити, що $I_{L\,min}$ – мінімальне значення струму дроселя – дорівнює амплітуді струму навантаження $I_н = U_ж/R_н$:

$$I_{L\,min} = I_н = U_ж/R_н, \qquad (2.46)$$

а максимальне значення струму $I_{д\,max}$ (див. рис. 2.20, *б*) через діоди ***VD1, VD2*** визначається як

$$I_{д\,max} = I_{L\,max} - I_{L\,min} = U_ж/2L_н. \qquad (2.47)$$

Отже, струм навантаження $i_н(t)$ має прямокутну форму з амплітудою $U_ж/R_н$ незалежно від опору $R_н$.

До переваг розглянутих однофазних однотактних схем інверторів слід віднести простоту їхнього виконання, а до недоліків – несиметричність форми кривої вихідної напруги та її змінювання зі змінюванням навантаження, відсутність можливості регулювання, стабілізації вихідної напруги (струму), можливість роботи лише на активне навантаження.

Інвертор струму наведено на рис. 2.21, *а*. Періодична комутація навантаження $Z_н$ ключами ***S1, S3*** й ***S2, S4*** до первинного джерела живлення $U_ж$ постійного струму здійснюється через послідовно увімкнений реактор ***L***. Значення індуктивності реактора обирається відповідно до великої величини з умови незначної зміни струму на інтервалах комутації ключів ***S1...S4***. Як наслідок навантаження $Z_н$ живиться від джерела струму, а ключі ***S1, S3*** й ***S2, S4*** почергово змінюють напрямок протікання струму $i_н$ у колі навантаження. Даний інвертор дістав назву *інвертора струму*.

Вочевидь (див. рис. 2.21), що для інверторів струму притаманне формування у навантаженні струму прямокутної форми, а напруга залежить від параметрів навантаження. Реактор ***L***, виконуючи роль генератора стру-

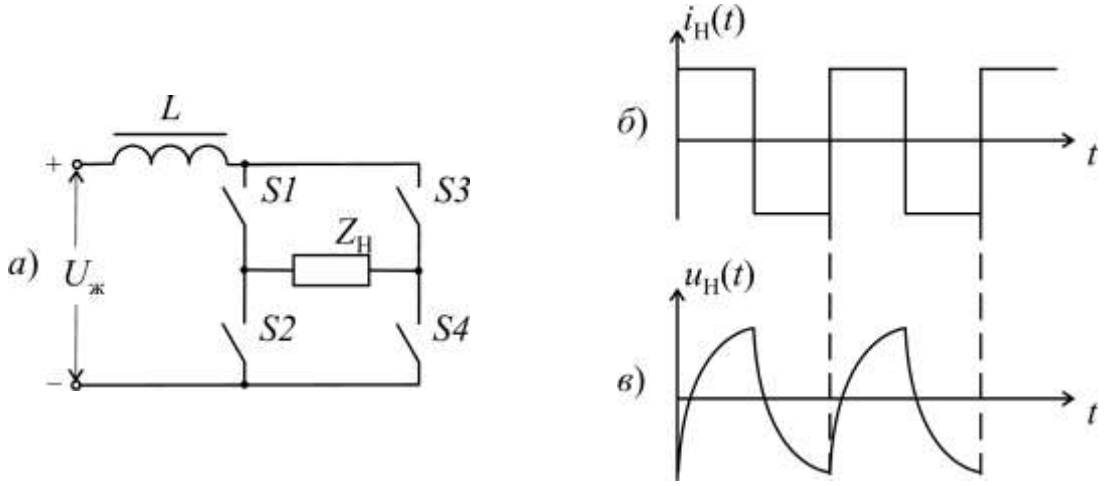


Рисунок 2.21 – Інвертор струму (*а*) і діаграми, які ілюструють характер струму $i_н(t)$ (*б*) і напруги $u_н(t)$ (*в*) у колі його навантаження

му, виконує й функцію фільтра вищих гармонік напруги, забезпечуючи аперіодичний режим роботи інвертора з малими пульсаціями вхідного струму. Для інвертора струму притаманна робота з активно-ємнісним на-

вантаженням, коли інвертований струм випереджає за фазою напругу на навантаженні. При використанні в якості силових комутувальних елементів тиристорів це дозволяє поміж анодом та катодом тиристора, що закривається, протягом певного часу підтримувати від'ємну напругу, що сприяє відновлянню запірних властивостей тиристора.

Оскільки опір навантаження $\boldsymbol{Z_н}$ переважно, має ємнісний характер, це виключає перенапругу на елементах схеми (у тому числі й на ***S1...S4***).

Інвертор напруги подано на рис. 2.22, *а*, де навантаження $\boldsymbol{Z_н}$ підми-

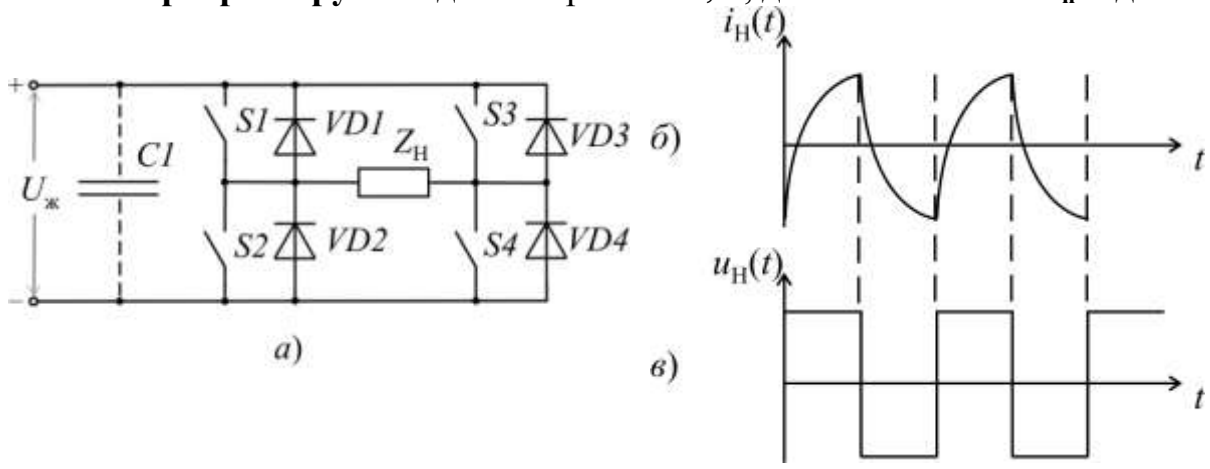


Рисунок 2.22 – Інвертор напруги (*а*) та діаграми, які ілюструють характер струму $\boldsymbol{i_н(t)}$ (*б*) та напруги $\boldsymbol{u_н(t)}$ (*в*) у колі навантаження

кається періодично парами ключів ***S1, S3*** й ***S2, S4*** безпосередньо (на відміну від схеми рис. 2.21, *а*) до первинного джерела живлення з вихідною напругою $\boldsymbol{U_ж}$. Як наслідок змінюється полярність напруги $\boldsymbol{U_н}$ на навантаженні $\boldsymbol{Z_н}$, тобто навантаження нібито живиться від джерела змінної напруги. Тому такий інвертор дістав назву інвертора напруги. Інвертори напруги формують у навантаженні напругу, а форма струму є функцією характеру навантаження.

Опір навантаження $\boldsymbol{Z_н}$ у цьому разі має мати активний або індуктивно-активний характер (за ємнісного характеру навантаження $\boldsymbol{Z_н}$ при комутації ключів ***S1, S3*** й ***S2, S4*** матимуть місце стрибки струмів). Діоди ***VD1...VD4*** забезпечують повернення накопиченої в індуктивності навантаження $\boldsymbol{Z_н}$ енергії до первинного джерела живлення.

Якщо інвертор живиться від випрямного пристрою, то на його виході встановлюється конденсатор ***C1*** (див. рис. 2.22, *а*) доволі великої ємності. Цей конденсатор забезпечує провідність джерела електричної енергії у зворотному напрямку й виконує функції фільтра вищих гармонік. Струми, що протікають через діоди ***VD1...VD4***, є протилежними до струмів ключів ***S1...S4***. Через це ці діоди дістали назву "зворотних" діодів (рис. 2.22).

Резонансний інвертор (рис. 2.23) посідає нібито проміжне місце поміж інверторами струму й напруги. Існують паралельні, послідовні й паралельно-послідовні резонансні інвертори.

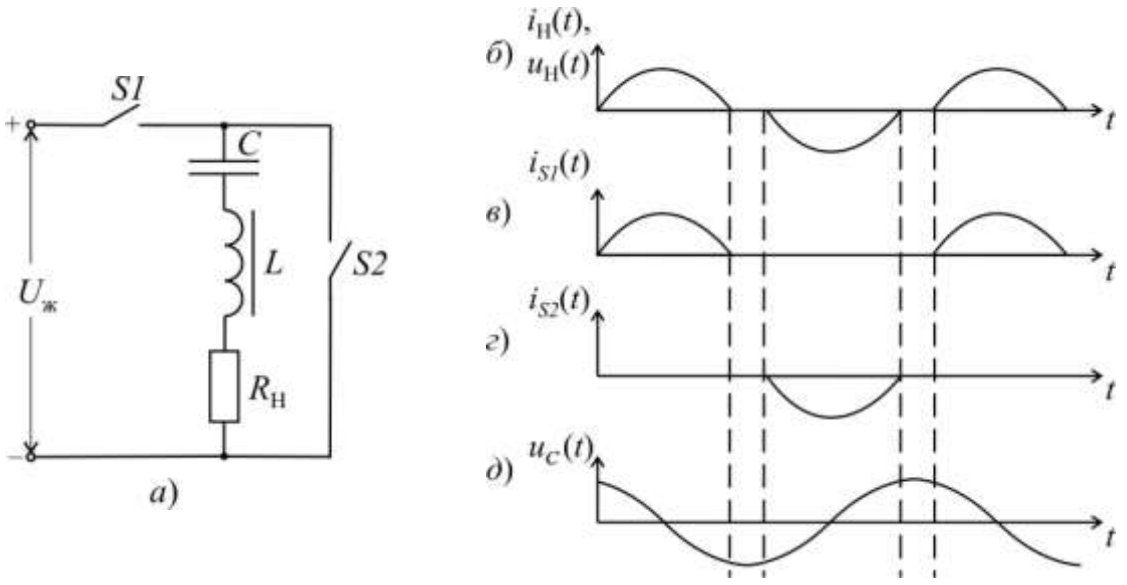


Рисунок 2.23 – Схема резонансного інвертора (*а*) та діаграми його струмів та напруг: напруга $u_н(t)$ та струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$(*б*); струм $i_{S1}(t)$ ключа *S1*(*в*), струм $i_{S2}(t)$ ключа *S2*(*г*) і напруга $u(t)$ конденсатора *C*(*д*).

В інверторах цього типу частину елементів резонансного коливального контура ***LC*** зазвичай безпосередньо поєднано з навантаженням. На рис. 2.23 зображено схему послідовного резонансного інвертора (рис. 2.23, *а*) та діаграми його роботи (рис. 2.23, *б*).

Параметри елементів ***L***, ***C*** та $\boldsymbol{R_н}$ обираються з умови забезпечення струму в колі навантаження коливального характеру з частотою власних коливань $\boldsymbol{\omega_0 = 2\pi/T_0}$, що збігається з частотою $\boldsymbol{\omega = 2\pi/T}$ комутації ключів ***S1***, ***S2***. Комутація ключів ***S1*** та ***S2*** здійснюється за нульових значень струмів, які протікають через них, що дозволяє звести до нуля динамічні втрати на перемикання. Тому резонансні інвертори доцільно використовувати на високих частотах перетворювання.

Варіанти побудови інверторів з використанням у якості силових комутувальних ключів ***S1***, ***S2***, … транзисторів відповідно ***VT1***, ***VT2***, … наведено на рис. 2.24. У загальному випадку за силові ключі може бути використано тиристори, симістори, польові транзистори.

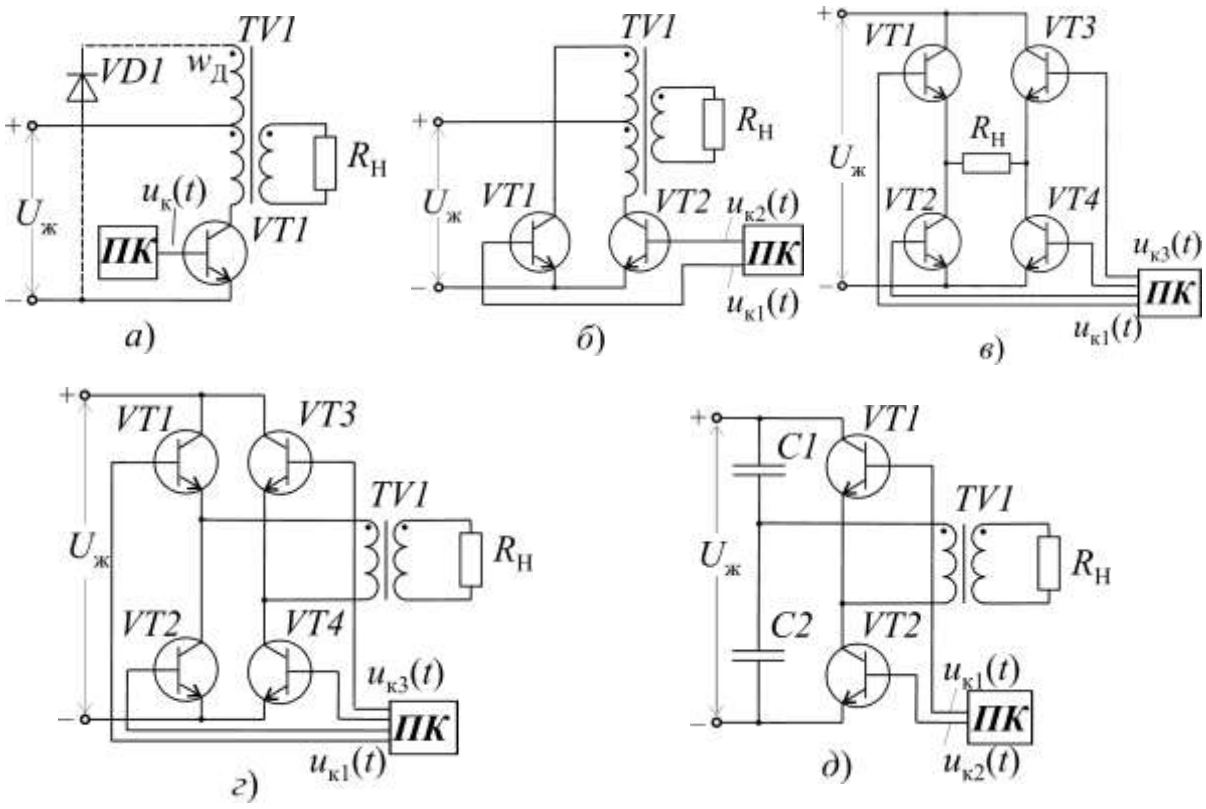


Рисунок 2.24 – Схеми інверторів: однотактного (*а*); двотактних: з виведенням середньої точки трансформатора (*б*); мостового – без гальванічної (*в*) та з гальванічною (*г*) розв'язкою вхідних та вихідних кіл; півмостового (*д*)

2.4.3 Тиристорний інвертор напруги

Розглянемо схему тиристорного інвертора напруги, зображену на рис. 2.25. Схема складається з пристрою (схеми) керування ***ПК*** та силової частини: силового трансформатора ***TV1***, тиристорів ***VS1, VS2***, зворотних діодів ***VD1***, ***VD4***, відсічних діодів ***VD2, VD3***, дроселя ***L1*** та комутаційного конденсатора ***C1***. Тиристори ***VS1, VS2*** перемикаються почергово через половину періоду за рахунок впливу на їхні входи керування імпульсних сигналів $\boldsymbol{u_{к1}(t)}$ та

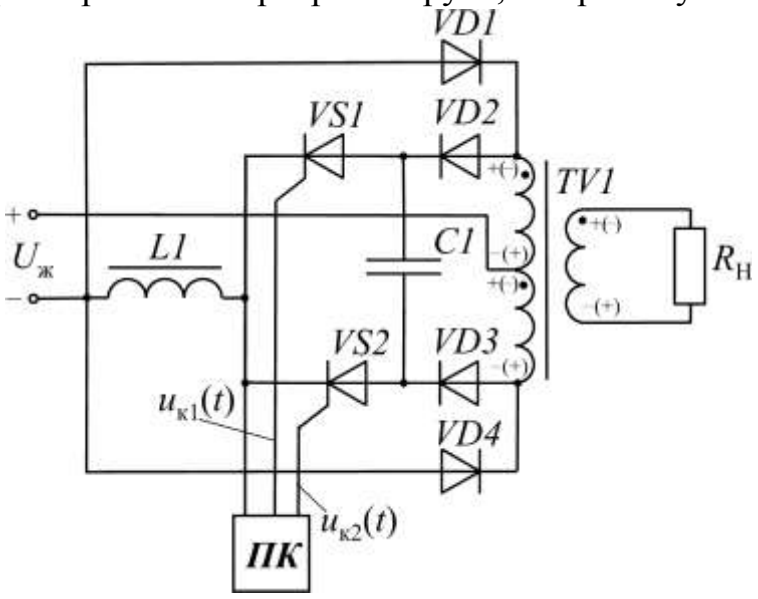


Рисунок 2.25 – Тиристорний інвертор

$u_{к2}(t)$ з виходів пристрою керування ***ПК***. Коли відкритий тиристор ***VS1,*** від первинного джерела електроживлення (наприклад від акумуляторної батареї) тече струм по колу: $+U_ж$, середня точка трансформатора ***TV1***, обмотка ***W1***, діод ***VD2***, тиристор ***VS1,*** дросель ***L1*** , $–U_ж$.

Струм обмотки ***W1*** створює магнітний потік, який наводить е. р. с. у всіх обмотках трансформатора з полярністю, зазначеною в дужках. За такої полярності конденсатор ***C1*** заряджається по колу: $+U_ж$, середня точка трансформатора ***TV1***, обмотка ***W2,*** діод ***VD3***, конденсатор ***C1***, тиристор ***VS1,*** дросель ***L1,*** $–U_ж$.

Через половину періоду пристрій керування ***ПК*** формує сигнал $u_{к2}(t)$ для відкривання тиристора ***VS2***. Комутаційний конденсатор ***C1*** починає розряджатися через тиристори ***VS1, VS2*** і ще не закритий ***VS1***.

Струм розряду конденсатора ***C1*** є зворотним для тиристора ***VS1***, тому останній закривається. Від джерела електроживлення протікає струм по колу: $+U_ж$, середня точка трансформатора ***TV1***, обмотка ***W2***, діод ***VD3***, тиристор ***VS2***, дросель ***L1,*** $–U_ж$. Струм обмотки ***W2*** створює магнітний потік, який наводить е. р. с. у всіх обмотках трансформатора з полярністю, зазначеною без дужок. За такої полярності комутаційний конденсатор перезаряджається по колу: $+U_ж$, середня точка трансформатора ***TV1***, обмотка ***W1,*** діод ***VD2***, конденсатор ***C1***, тиристор ***VS2***, дросель ***L1,*** $–U_ж$.

Через половину періоду пристрій керування ***ПК*** знову відкриває, впливаючи сигналом керування $u_{к1}(t)$, тиристор ***VS1***. Розряд конденсатора ***C1*** через ***VS1*** та ***VS2*** швидко закриває тиристор – переводить у розімкнутий непровідний стан тиристор ***VS2*** – і процес повторюється.

Дросель ***L1*** перешкоджає стрибкам струму при комутації тиристорів, обмежує швидкість наростання струму перезаряду комутаційного конденсатора ***C1***, а також перешкоджає перекиданню інвертора.

Зворотні діоди ***VD1, VD4*** забезпечують повернення до джерела живлення ***G1*** реактивної енергії дроселя ***L1*** при перезаряджанні комутаційного конденсатора ***C1***.

За наявності зворотних діодів характеристика навантаження інвертора стає пологою, а форма напруги наближається до прямокутної.

Діоди ***VD2, VD3*** перешкоджають розряджанню конденсатора ***C1*** через первинну обмотку трансформатора ***TV1***. Наявність цих діодів дозволяє зменшувати ємність комутаційного конденсатора вчетверо.

Частота змінного струму у навантаженні визначається частотою роботи пристрою керування ***ПК***.

2.5 До дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги

2.5.1 Стабілізатори. Загальні відомості

Стабільність напруги джерела первинного електроживлення найчастіш не відповідає вимогам навантаження. Для стабілізації напруги (струму) використовують стабілізатори – пристрої, які автоматично підтримують у заданих межах напругу (струм) на боці споживача електричної енергії за впливу будь-яких дестабілізуючих чинників: змінювання напруги мережі живлення, струму навантаження, умов навколишнього середовища (температури, тиску, вологості), часу тощо.

Принцип роботи будь-якого стабілізатора полягає в тому, що за впливу дестабілізуючих чинників автоматично відбувається змінювання одного чи кількох параметрів стабілізатора, за якого забезпечується режим стабілізації напруги (струму) у колі навантаження – підтримується із заданим ступенем точності на потрібному рівні.

Існують два найпоширеніші способи стабілізації: параметричний і компенсаційний.

За параметричного способу стабілізації керування виконавчим регулювальним елементом виконується за допомогою того самого зовнішнього впливу, який порушує сталість вихідної стабілізованої величини напруги (струму) стабілізатора. Це призводить до змінювання надходження величини потоку електричної енергії, яка надходить від джерела первинного живлення до кола навантаження. У параметричному стабілізаторі стабілізуючі властивості визначаються характеристикою некерованого нелінійного елемента і відсутні елементи, які вимірюють відхилення напруги (струму) від заданого значення. Як регулятори в даних стабілізаторах використовуються елементи, які мають яскраво виражені нелінійні вольт-амперні характеристики (стабілітрони, варистори тощо).

За компенсаційного методу стабілізації на виконавчий регулювальний елемент впливає сигнал розузгоджування, який визначається за рахунок вимірювання відхилення вихідної стабілізованої величини напруги (струму) від заданого значення та порівняння його з еталонною величиною. Регулювальний елемент при цьому змінює режим роботи в такий спосіб що змінюється надходження потоку електричної енергії від джерела первинного живлення до кола навантаження і, як наслідок цього, забезпечується компенсація відхилення величини напруги чи струму.

У даних стабілізаторах обов'язково присутні пристрої керування ***ПК***, які вимірюють величину відхилення стабілізуючого параметра. Вони формують сигнал керування регулювальним елементом в такий спосіб, щоби компенсувати вплив будь-яких дестабілізуючих чинників.

Залежно від режиму роботи регулювального елемента розрізнюють компенсаційні стабілізатори з неперервним регулюванням потоку електричної енергії та з імпульсним регулюванням.

Порівняння основних параметрів зазначених типів стабілізаторів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – **Порівняльне оцінювання стабілізаторів**

Параметр	**Стабілізатори з імпульсним регулюванням**	**Стабілізатори з неперервним регулюванням**
к.к.д.	65...92 %	25...50 %
Мінімальне підвищення температури	20...40 ºС	50...100 ºС (залежить від способу відведення тепла)
Рівень пульсації	20...50 мВ	≤5 мВ (менше значення, істотно підвищить вартість схеми)
Відносне змінювання вихідної напруги	0,3 % (мінімальне)	0,1 % (менше значення, істотно підвищить вартість схеми)
Питома потужність	100... 300 Вт /дм^3	15...60 Вт/дм^3
Захист від імпульсних завад у мережі	60 дБ (мінімум)	Як правило, менше ніж у імпульсних стабілізаторів
Електромагнітне випромінювання	Потужне. Вимагає екранування та фільтрації	Практично відсутнє
Надійність	Велика кількість елементів знижує надійність. Використовування інтегральних схем підвищує надійність.	Залежить від температури. Підвищення робочої температури знижує надійність
Вартість, об'єм і маса	Більше (порівняно з неперервними).Знижуються зі збільшенням вихідної потужності	Малопотужні стабілізатори мають меншу вартість порівняно з імпульсними

Як видно з таблиці, стабілізатори з неперервним регулюванням мають більшу ефективність за невеликих потужностей стабілізації, а також там, де потрібні високий коефіцієнт стабілізації, низька величина пульсацій та електромагнітного випромінювання.

Більшість сучасних стабілізаторів малої потужності є інтегральними. На рис. 2.26 наведено принципову схему мікросхем КР142ЕН1 та КР142ЕН2.

Ці мікросхеми являють собою своєрідний “конструктор”, на базі якого можна побудувати стабілізатор. Також випускаються функціонально завершені стабілізатори, які, окрім високих показників якості стабілізації напруги, мають функції захисту від короткого замикання в колі навантаження, захист від перевищення температури кристала та інші сервісні функції. Згадані мікросхеми випускаються в корпусі, який має всього три виводи

(ТО-220, КТ-26) і практично не потребує підмикання додаткових зовнішніх елементів. Схему такого стабілізатора на вихідну напругу +12 В на базі мікросхеми КР142ЕН8Б (зарубіжний аналог L7812) наведено на рис. 2.27.

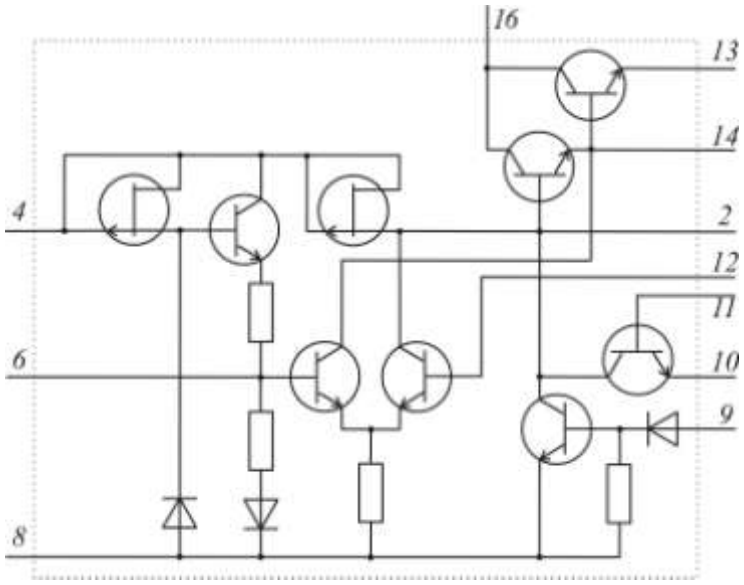


Рисунок 2.26 – Мікросхема КР142ЕН1(2) – “конструктор” для створювання стабілізаторів

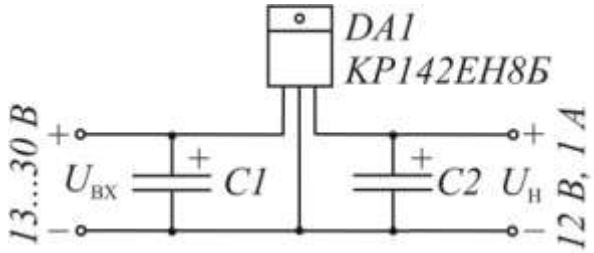


Рисунок 2.27 – Стабілізатор напруги (з $\boldsymbol{U_н}$ = +12 В) на базі мікросхеми КР142ЕН8Б

2.5.2 Принципи функціонування компенсаційних стабілізаторів

Існує два типи компенсаційних стабілізаторів: з послідовним (рис. 2.28, *а* та 2.29, *а*) і паралельним (рис. 2.28, *б* та 2.29, *б*) вмиканням регулювального елемента ***PE***. Найпоширенішою є схема, зображена на рисунку 2.28, *а*. Стабілізатори з паралельним вмиканням регулювального елемента (рис. 2.28, *б*) через надто низьке значення к. к. д. використовуються вельми рідко, переважно для стабілізації високої (понад 1кВ) напруги.

Принципи функціонування компенсаційного стабілізатора з послідовним вмиканням регулювального елемента (рис. 2.28, *а*) полягає у перерозподілі вхідної напруги $\boldsymbol{U_{вх}}$ на подільнику напруги, утворюваному внутрішнім опором $\boldsymbol{R_{PE}}$ регулювального елемента й опором $\boldsymbol{R_н}$ навантаження. Змінюючи внутрішній опір $\boldsymbol{R_{PE}}$ регулювального елемента, можна змінювати коефіцієнт передавання подільника напруги, а отже й величину вихідної напруги $\boldsymbol{U_н}$ у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$.

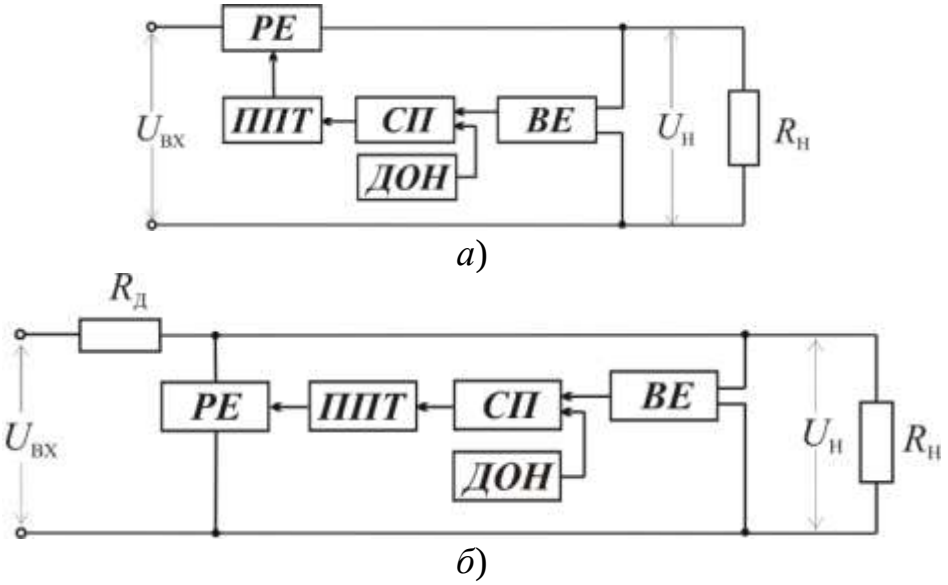


Рисунок 2.28 – Компенсаційні стабілізатори напруги з послідовним (*а*) та паралельним (*б*) вмиканням регулювального елемента й навантаження

Принципи функціонування компенсаційного стабілізатора з паралельним вмиканням регулювального елемента (див. рис. 2.29, *б*) є аналогічні, але тут подільник напруги утворено опорами $\boldsymbol{R_д}$ і паралельним поєднанням внутрішнього опору $\boldsymbol{R_{РЕ}}$ регулювального елемента й опору навантаження $\boldsymbol{R_н}$.

На вхід схеми порівнювання ***СП*** (див. рис. 2.29) надходять два сигнали: сигнал з виходу вимірювального елемента ***ВЕ***, пропорційний до напруги $\boldsymbol{U_н}$ навантаження, і сигнал з джерела опорної напруги (***ДОН***). Вихідний сигнал схеми порівнювання, пропорційний щодо помилки вихідної напруги, через підсилювач постійного струму ***ППС*** подається на вхід регулювального елемента ***РЕ***, змінюючи його внутрішній опір в такий спосіб, щоб зменшити відхиляння напруги навантаження $\boldsymbol{U_н}$ від номіналу. Так здійснюється регулювання вихідної напруги стабілізатора.

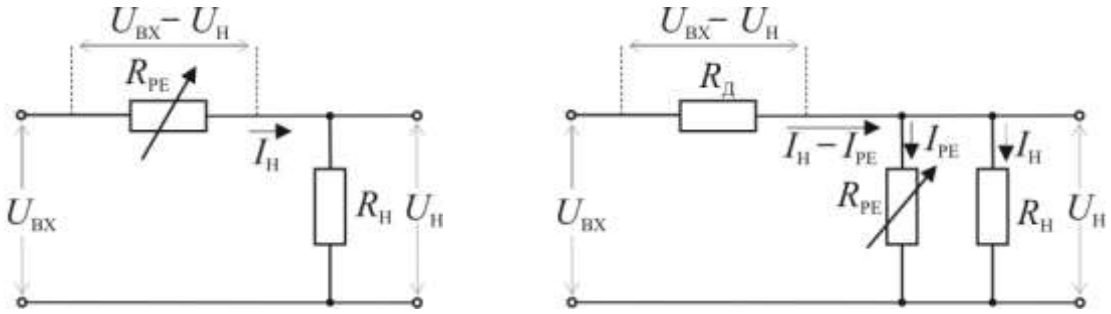


Рисунок 2.29 – До принципів функціонування компенсаційних стабілізаторів з послідовним (*а*) й паралельним (*б*) вмиканням регулювального елемента та навантаження

Як регулювальний елемент ***РЕ*** найчастіш використовують біполярні транзистори. Як джерело опорної напруги ***ДОН*** використовують термостабілізовані параметричні стабілізатори. У якості ***СП*** та ***ППС*** може бути використано біполярні транзистори та операційні підсилювачі. Як правило, функції ***СП*** та ***ППС*** суміщено: їх виконує один елемент схеми.

Розглянемо принцип роботи компенсаційного стабілізатора напруги, схему якого зображено на рис. 2.30.

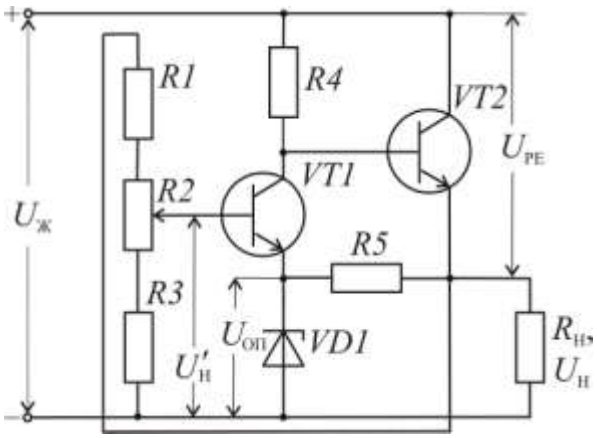


Рисунок 2.30 – Принципова схема стабілізатора напруги

Транзистор ***VT2*** функціонує як регулювальний елемент ***РЕ***. Транзистор ***VT1*** поєднує функції схеми порівнювання ***СП*** та підсилювача постійного струму ***ППС***. Джерело опорної напруги ***ДОН*** зібрано на елементах ***R5*** та ***VD1***, які увімкнено за схемою параметричного стабілізатора напруги. Резистор ***R4*** є колекторним навантаженням ***ППС***.

Напруга навантаження подається на базу транзистора ***VT1*** через вимірювальний елемент ***ВЕ –*** подільник напруги на резисторах ***R1…R3***, напруга на виході якого дорівнює

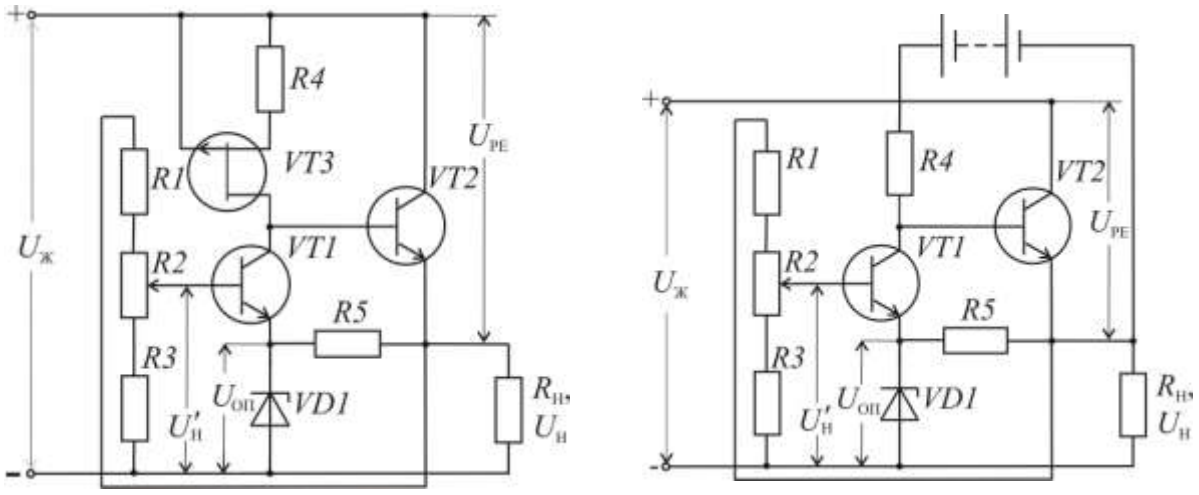
$$U'_н = U_н \frac{R3 + R2_{ниж}}{R1 + R2 + R3}, \qquad (2.48)$$

де $R2_{ниж}$ – опір нижньої (за схемою) частини резистора ***R2***.

Емітер транзистора ***VT1*** підімкнено до джерела опорної напруги ***ДОН*** – стабілітрона ***VD1*** – з вихідним рівнем напруги, рівним $U_{оп}$. Збільшення напруги на навантаженні призведе до збільшення напруги поміж базою та емітером ***VT1***, і до збільшення його струму бази. Оскільки струм $I_к$ колектора ***VT1*** є пропорційний до струму бази $I_б$, ($I_к = \beta I_б$, **β –** коефіцієнт підсилення струму транзистора ***VT1***), то він також збільшиться. Це призведе до зменшення напруг колектор–емітер ***VT1*** і база-емітер ***VT2***. Зменшення напруги поміж базою та емітером ***VT2*** призведе до зменшення струму колектора ***VT2***, до збільшення спадання напруги на регулювальному елементі ***РЕ*** й до зменшення напруги на навантаженні до рівня, близького до номінального.

Параметри стабілізатора залежать від способу живлення колекторного кола ***ППС***. Для підвищення стабільності вихідної напруги стабілізатора колекторне коло ***ППС*** може бути підімкнено через стабілізатор струму (рис. 2.31, *а*) або до окремого стабілізованого джерела живлення (рис. 2.31, *б*).

Внутрішній вихідний опір перетворювача електричної енергії (випрямляча, стабілізатора) є динамічним показником. Він зазначає наскільки зміниться напруга на виході пристрою за змінювання вихідного струму.



а) *Б*)

Рисунок 2.31 – Способи підвищення стабільності стабілізаторів: з використовуванням стабілізатора струму (*а*) та додаткового джерела живлення (*б*)

2.5.3 Показники якості стабілізатора

Основними дестабілізуючими чинниками, які спричинюють відхилляння $\Delta U_н = U_н - U_{н\ ном}$ від номінального значення $U_{н\ ном}$ вихідної напруги $U_н$, є змінювання значення $\Delta U_{вх}$ вхідної напруги та струму $\Delta I_н$ навантаження перетворювача:

$$\Delta U_{вх} = U_{вх} - U_{вх\ ном};\ \Delta U_ж = U_ж - U_{ж\ ном};\ \Delta I_н = I_{н\ ном} - I_н .$$

Їхні відносні величини – значення нестабільності визначаються у вигляді

$$N_{вх} = \Delta U_{вх}/U_{вх\ ном};\ \ N_ж = \Delta U_ж/U_{ж\ ном};\ \ N_і = \Delta I_н/I_{н\ ном}.$$

Якість стабілізації стабілізованих перетворювачів електричної енергії оцінюється такими показниками якості:

- величиною нестабільності (статичною помилкою) вихідної напруги:

$$N_н = \Delta U_н/U_{н\ ном}\ ; \qquad (2.49)$$

- коефіцієнтами $K_{ст}$ стабілізації напруги за вхідною напругою $U_{вх}$ за $I_н = \text{const}$:

$$K_{ст} = N_{вх}/N_н;$$

- коефіцієнтом стабілізації напруги за струмом $I_н$ навантаження за $U_{вх} = \text{const}$:

$$K_{сті} = N_і/N_н;$$

- вихідним опором

$$r_{ст} = \Delta U_н / \Delta I_н . \qquad (2.50)$$

Енергетичним показником якості, який оцінює функціонування перетворювачів електричної енергії, є коефіцієнт корисної дії η. Визначається як відношення корисної потужності $P_н$ у навантаженні $R_н$ до активної потужності $P_{вх} = P_ж$, споживаної від джерела електричної енергії з нестабілізованою напругою:

$$\eta_1 = \frac{P_н}{P_{вх}} \cdot 100\ \%;$$

$$P_н = U_н I_н;\ P_{вх} = U_{вх} I_{вх}.$$

Чим менше є внутрішній динамічний опір, тим оптимальніше є досліджуваний пристрій – стабілізатор напруги (струму). В ідеальному випадку для стабілізатора напруги $r_{вн} = 0$, а для стабілізатора струму $r_{вн} = \infty$.

Коефіцієнт згладжування пульсацій засвідчує, у скільки разів відносна величина пульсацій на виході стабілізатора є менша за відносну пульсацію на вході стабілізатора.

Коефіцієнт згладжування (зменшення змінної складової), який має стабілізатор, обчислюється за виразом

$$K_{СГ} = \frac{U_{~вх} U_н}{U_{~н} U_{вх}}, \qquad (2.51)$$

де $U_{~вх} = U_{~ж}$, $U_{~н}$ – величини напруги (амплітудне значення) змінної складової відповідно на вході й виході стабілізатора.

2.6 До дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом

2.6.1 Завдання щодо перетворювання електричної енергії. Структурні схеми перетворювачів електричної енергії

Потребу перетворення електричної енергії зумовлено різноманіттям споживачів електричної енергії, їхньою специфікою, а часто різноманіттям джерел первинного електроживлення. Вимоги споживача щодо якості електричної енергії джерела електроживлення також призводять до необхідності її перетворювання. При цьому рід струму може бути змінено чи збережено початковим.

На рис. 2.32 наведено структурні схеми перетворювачів електричної енергії, які ілюструють особливості їхньої побудови, а на рис. 2.33 – діаграмами, які ілюструють характер електричних процесів, котрі в них протікають.

У першій структурній схемі (рис. 2.32, *а*) реалізовується перетворення електричної енергії джерела первинного електроживлення ***ДПЕ*** пос-

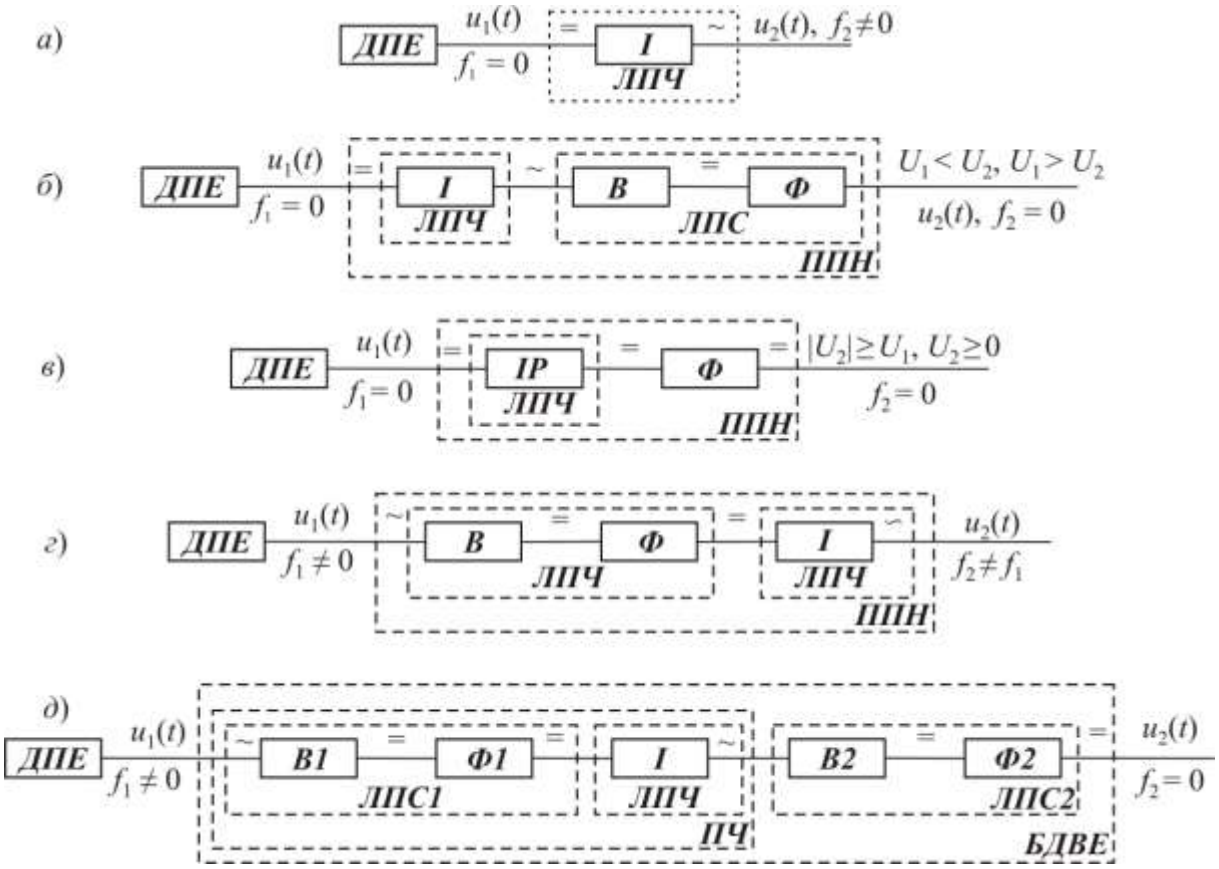


Рисунок 2.32 – Структурні схеми перетворювачів електричної енергії

тійного струму з напругою $\boldsymbol{u_1(t)}$, частотою $\boldsymbol{f_1 = 0}$ на змінний струм з напругою $\boldsymbol{u_2(t)}$, частотою $\boldsymbol{f_2 \neq 0}$. Ця операція називається інвертуванням, а пристрій, який реалізує дане перетворення, дістав назву інвертор ***І***. Основу його силового каналу становить ланка підвищеної частоти. У загальному випадку напруга $\boldsymbol{u_2(t)}$ на виході інвертора ***І*** може бути різної форми, наприклад прямокутною (рис. 2.33, *б*), синусоїдною (рис. 2.33, *в*).

При змінюванні значення вхідної напруги $\boldsymbol{u_1(t)}$ (східчасто – у момент часу $\boldsymbol{t_1}$ або лінійно – з моменту часу $\boldsymbol{t_2}$ (див. рис. 2.33, *а*), пропорційно й синфазно (див. рис. 2.33, *б*, *в*) відбуваються змінювання змінних напруг $\boldsymbol{u_2(t)}$) на виході інвертора ***І***.

Розглянемо два варіанти реалізації (див. рис. 2.32, *б*, *в*) процесу перетворювання постійного струму однієї напруги на постійний струм іншої напруги.

Пристрої, які реалізують цей процес змінювання рівня (величини) постійної напруги, називаються перетворювачами постійної напруги ***ППН***. У деяких літературних джерелах задля позначання даного виду перетворювачів використовують такі назви, як “конвертор”, “трансформатор постійного струму”

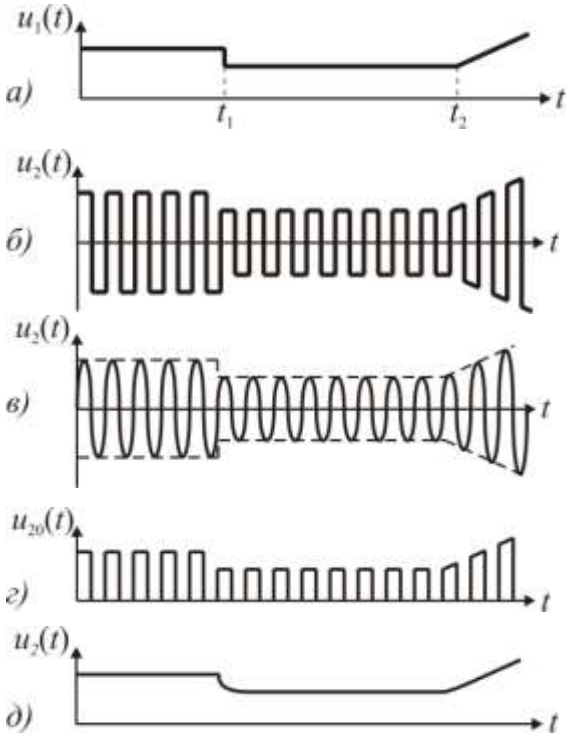


Рисунок 2.33 – Діаграми напруг

У першому випадку (рис. 2.32, *б*) пристрій містить дві ланки: ланка підвищеної частоти ***ЛПЧ*** і ланка постійного струму ***ЛПС***. На відміну від схеми рис. 2.32, *а*, яка реалізує лише функцію інвертування, додавання ***ЛПС***, яка складається з послідовно увімкнених випрямляча ***В*** та фільтра ***Ф***, дозволяє перетворювати електричну енергію постійного струму на постійний з іншим рівнем напруги. Схема пристрою має дві явно виражених ланки: інвертор ***І*** – ланка підвищеної частоти, яка перетворює постійний струм на змінний, і ланка постійного струму, яка перетворює електричну енергію змінного струму на постійний. Як буде показано нижче, інвертор ***І*** у своєму складі може містити трансформатор, що дозволяє забезпечувати за необхідності й гальванічну розв'язку вхідних та вихідних кіл перетворювача (і ***ДПЕ*** й навантаження). Напруга $\boldsymbol{u_2(t) = U_2 = \text{const}}$ за $\boldsymbol{f_2 = 0}$ на виході перетворювача може бути за рівнем як вище, так і нижче за $\boldsymbol{u_1(t) = U_1 = \text{const}}$.

Пристрій другого типу (див. рис. 2.32, *в*) не містить у своєму складі інвертора і являє собою послідовне сполучення ланки підвищеної частоти ***ЛПЧ***, функції якої виконує імпульсний регулятор ***ІР***, і згладжувального фільтра ***Ф***. Постійна напруга $\boldsymbol{U_1}$ джерела первинного електроживлення ***ДПЕ*** перетворюється імпульсним регулятором ***ІР*** на послідовність $\boldsymbol{u_{20}(t)}$ прямокутних імпульсів (див. рис. 2.33, *г*), потім фільтр ***Ф*** відокремлює з них середнє значення $\boldsymbol{u_2(t)}$ (див. рис. 2.33, *д*). При цьому рід струму не змінюється, напруга $\boldsymbol{u_2(t)}$ за величиною може бути від **0** до $\boldsymbol{U_1}$ (якщо не враховувати спадання напруги на ***ІР*** та ***Ф***) в понижувальній схемі ***ІР***. В підви-

щувальній схемі ***ІР*** забезпечується $U_2 > U_1$, а в полярно-інвертувальній полярність напруги U_2 змінюється на протилежну, при цьому $|U_2| < > U_1$.

Змінний струм однієї частоти (наприклад **50, 400, ... Гц**) може бути перетворено на змінний струм іншої частоти (як правило, більш високої: десятки, сотні кілогерців) за допомогою напівпровідникового перетворювача частоти. Співвідношення частот вхідної й вихідної напруг може бути фіксованим і змінним. Перше притаманне для побудови джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом, а друге, наприклад, – для регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів.

У схемі перетворювача частоти, зображеній на рис. 2.32, *г*, можна виділити ланку постійного струму ***ЛПС***, яка складається з випрямляча ***В*** та фільтра ***Ф***, і ланку підвищеної частоти ***ЛПЧ*** – з інвертора ***І***. На вхід випрямляча ***В*** надходить змінна напруга U_1 з частотою f_1. Вона випрямляється випрямлячем ***В***, згладжується фільтром ***Ф*** і надходить на вхід інвертора ***І*** (ланки підвищеної частоти ***ЛПЧ***). Інвертор ***І*** перетворює постійну вхідну напругу на змінну з частотою $f_2 \neq f_1$. У загальному випадку частота f_2 може не дорівнювати f_1.

Якщо в схемі рис. 2.32, *в*, яка є перетворювачем частоти ***ПЧ***, на вихід підімкнути ланку постійного струму ***ЛПС2*** з послідовно сполучених випрямляча ***В2*** та фільтра ***Ф2***, здобудемо схему побудови перетворювача змінної напруги з напругою $u_1(t)$ і частотою f_1 на постійну $u_2(t) = U_2 = \text{const}$ з нульовою частотою ($f_1 = 0$). Такі структури (рис. 2.32, *д*) є базою побудови джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом ***БДВЕ***. Підвищення робочої частоти (понад **100 кГц**) у проміжній ланці підвищеної частоти дозволяє значно зменшити об'єм і масу джерела вторинного електроживлення і набути високих техніко-економічних показників.

Всі структурні схеми на рис. 2.32 містять у своєму складі ланку підвищеної частоти ***ЛПЧ***, яка перетворює електричну енергію постійного струму на електричну енергію змінного (див. рис. 2.32, *а*, *б*, *г*) або постійного струму (див. рис. 2.32, *в*, *д*).

Наведені структурні схеми (див. рис. 2.32) і діаграми (див. рис. 2.33) відбивають лише варіанти перетворювання електричної енергії. Поряд з цим на практиці часто виникає завдання регулювання потоку електричної енергії, яка надходить від ***ДПЕ*** до навантаження з метою стабілізації чи то змінювання за певним законом вихідної напруги (струму). У цих випадках до схем рисунка 2.32 впроваджують спеціальні регулятори або їхні функції поєднуються в одному зі структурних вузлів схеми.

На сьогодні виникла тенденція підвищення частоти перетворювання електричної енергії. Частота перетворювання може становити від одиниць кілогерців до десятків мегагерців. Це сприяє зменшенню габаритів, маси окремих реактивних елементів, а отже й пристроїв перетворювання електричної енергії в цілому.

У системах електропередавання та електропостачання використовуються інвертори, ведені мережею. Наприклад, при узгоджуванні двох енергосистем з відрізнюваними параметрами (за стабільністю чи то значенням частоти) використовуються випрямно-інверторні підстанції. Змінна напруга однієї енергосистеми випрямляється і у вигляді постійного струму подається на інвертор, який перетворює її на змінний струм, що передається іншій енергосистемі з частотою цієї системи.

Електроживлення змінним струмом технічних засобів зв'язку, систем опрацьовування, зберігання й розподілу інформації з використовуванням ЕОМ, систем аварійного освітлення, контролю й захисту різних об'єктів (атомних електростанцій, промислових підприємств й ін.) припускає перерву в електропостачанні на вельми короткий час (частки секунд, десятки секунд), а в деяких випадках зовсім не припускає його.

Зазначений режим забезпечують агрегати безперебійного живлення на базі автономних інверторів та різного роду накопичувачів електричної енергії (акумуляторних батарей чи електрохімічних джерел постійного струму). За перерв в електропостачанні промислової мережі до запуску резервних джерел електропостачання споживачі забезпечуються електроенергією від автономних інверторів, які перетворюють електроенергію зазначених накопичувачів.

В автономних електросистемах з виходом постійного струму автономні інвертори є необхідною складовою частиною. Тут електрична енергія постійного струму первинного джерела електроживлення (наприклад електрохімічного генератора) перетворюється за допомогою автономного інвертора на електроенергію змінного струму з відповідними параметрами промислової мережі. Вихідна потужність таких інверторів може становити від одиниць до кількох десятків кіловат.

Низка споживачів електричної енергії використовує електроенергію у вигляді змінного струму з частотою, відмінною від **50 Гц**. У цих випадках для електропостачання застосовуються перетворювачі частоти.

Перетворювачі частоти набули широкого застосовування в авіаційній і в космічній техніці, де вельми часто використовують електропостачання змінним струмом з частотою **400 Гц**.

Автономні інвертори використовуються як проміжна ланка не тільки в перетворювачах частоти, але й у перетворювачах постійного струму. Це зумовлено тим, що підвищення робочої частоти перетворювача дозволяє значно зменшити масу й габарити пристрою в цілому.

Пристрої сучасної силової перетворювальної техніки дозволяють керувати потоками електричної енергії не тільки з метою її перетворювання з одного виду на інший, але й для розподілу й організації швидкодіючого захисту електричних кіл.

Силові пристрої перетворювальної техніки використовуються на малі, середні й великі потужності. Вони перекривають широкі потреби прак-

тики: для засобів зв'язку, тягових підстанцій, електрифікованого залізничного транспорту, регульованого електроприводу, хімічних та металургійних підприємств, живлення різних підйомників, ліфтів, магнітних кранів, у системах електроживлення та електропостачання різних об'єктів, у пристроях автоматики та автоматичного регулювання тощо.

2.6.2 Джерела вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом. Принципи побудови та функціонування

Функціональну схему стабілізованого імпульсного джерела вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом ***БДВЕ*** зображено на рис. 2.34.

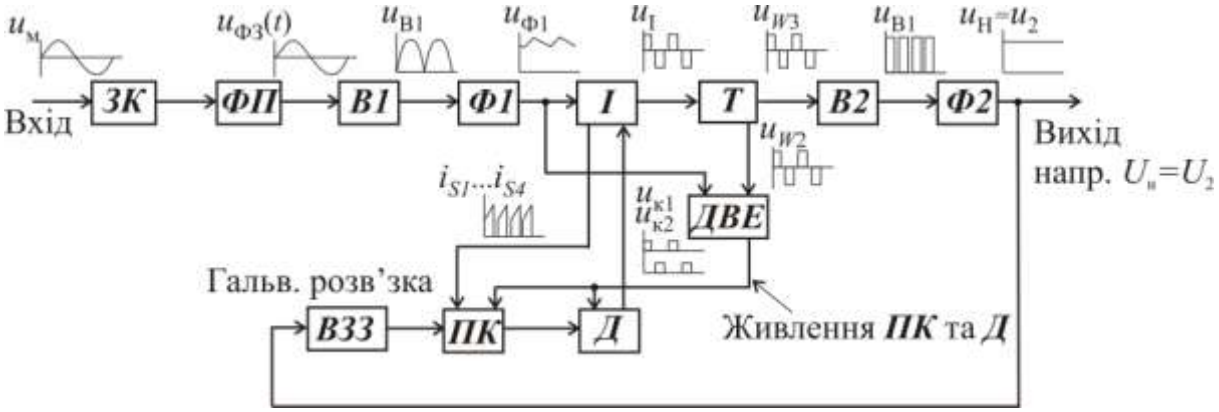


Рисунок 2.34 – Функціональна схема джерела живлення

Схема містить у собі такі блоки:

- запобіжне коло ***ЗК***;
- фільтр високочастотних завад ***Ф3***;
- вхідний (мережний) випрямляч ***В1***;
- вхідний згладжувальний фільтр ***Ф1***;
- інвертор ***І***, до складу якого входить трансформатор ***Т***;
- вихідний випрямляч ***В2***;
- вихідний згладжувальний фільтр ***Ф2***;
- пристрій (схема) керування ***ПК***;
- коло від'ємного зворотного зв'язку ***В33***;
- малопотужне джерело вторинного електроживлення ***ДВЕ***;
- драйвери ***Д.***

Вхідна змінна напруга $u_1(t)$ низької частоти (наприклад напруга $u_м(t)$ мережі з частотою $f_м$ мережі **50 Гц** (промислової мережі) або **400 Гц** (бортової мережі)) через запобіжне коло ***ЗК*** та фільтр ***ФП*** високочастотних завад потрапляє на вхідний випрямляч ***В1***.

Вхідний випрямляч ***В1*** виконано за мостовою схемою випрямляння. На його виході має місце пульсуюча напруга із частотою пульсації удвічі

більше за частоту мережі. На рис. 2.34 подано випадок використання як джерела первинного електроживлення промислової мережі з напругою 220 В й частотою 50 Гц. При цьому на виході вхідного випрямляча ***В1*** частота пульсації випрямленої напруги становитиме 100 Гц. Вхідний згладжувальний фільтр ***Ф1*** згладжує пульсації випрямленої напруги.

Постійна напруга з виходу згладжувального фільтра ***Ф1*** надходить на вхід інвертора ***І***, який перетворює її на змінну. Частота напруги на виході інвертора ***І*** визначається пристроєм керування ***ПК***. Вона значно перевищує частоту джерела первинного електроживлення. Сучасні інвертори працюють у діапазоні частот 10 кГц…3 МГц. Типова частота роботи інвертора становить 50…100 кГц. Змінна напруга перетворюється за величиною за допомогою високочастотного трансформатора ***Т***. Змінна вихідна напруга трансформатора ***Т*** випрямляється вихідним випрямлячем ***В2*** і згладжується вихідним згладжувальним фільтром ***Ф2***.

Оскільки трансформатор ***Т*** та вихідний згладжувальний фільтр ***Ф2*** працюють на високій частоті, їхні масогабаритні показники є значно менше порівняно з аналогічними показниками традиційних низькочастотних трансформатора й фільтра, які працюють на частоті промислової мережі 50 Гц. Незважаючи на використовування такого складного, на перший погляд, способу побудови джерела вторинного електроживлення, це сприяє зменшенню його маси та габаритів й, відповідно, позитивно впливає на його вартість.

Стабілізація напруги в колі навантаження забезпечується пристроєм керування ПК за допомогою одного з відомих методів регулювання, наприклад, з використанням методу широтно-імпульсної модуляції (***ШІМ***). Пристрій керування ***ПК*** забезпечує й захист від короткого замикання в навантаженні, виходу напруги джерела первинного електроживлення за межі припустимих значень. Сучасні пристрої керування – контролери – забезпечують і режим м'якого запуску, контролю “мертвого часу” (забезпечення гарантованої паузи поміж вимиканням транзистора одного плеча та вмиканням транзистора іншого плеча інвертора ***І***). Коло від’ємного зворотного зв'язку ***В33*** забезпечує передавання інформації про величину напруги на навантаженні до пристрою керування ***ПК***.

Драйвери ***Д*** силових ключів перетворюють сигнали на виході пристрою керування на сигнали, потрібні для роботи потужних силових ключів.

Драйвери ***Д*** виконують функції узгодження вихідних сигналів малопотужного пристрою керування ***ПК*** з вхідними колами силових комутувальних елементів (силових ключів) інвертора ***І***.

Малопотужне джерело вторинного електроживлення ***ДВЕ*** забезпечує електричною енергією пристрій керування ***ПК*** та драйвери.

Принципову електричну схему джерела живлення вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом ***БДВЖ***, відповідно функціональній схемі рис. 2.34, наведено на рис. 2.35.

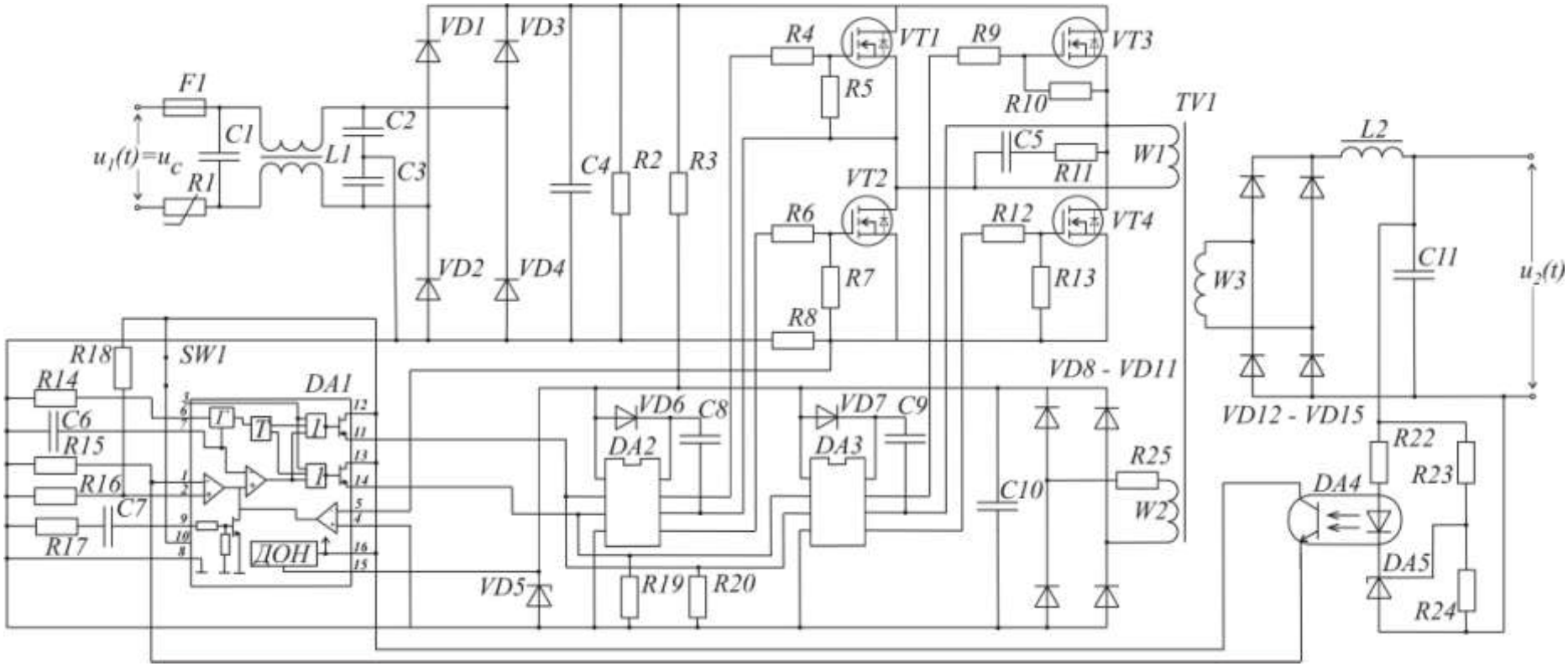


Рисунок 2.35– Принципова електрична схема джерела ***БДВЖ***

Запобіжне коло ***ЗК*** зображено на рис. 2.36, *а*. Воно складається із запобіжника ***F1*** та терморезистора ***R1***. Запобіжник призначено для захисту джерела первинного електроживлення від короткого замикання за виникнення несправностей діодів вхідного випрямляча ***B1***, конденсаторів фільтра ***Ф3*** імпульсних завад, вхідного згладжувального фільтра ***Ф1*** або силових транзисторів інвертора ***I***. Терморезистор ***R1*** обмежує струм через діоди вхідного випрямляча ***B1*** при підмиканні джерела до мережі змінного струму – промислової мережі. Оскільки конденсатор вхідного фільтра ***Ф1*** перебуває (до підмикання до мережі) у розрядженому стані, то він створює режим, еквівалентний до режиму короткого замикання. Опір терморезистора в холодному стані становить приблизно 5...10 Ом. Це дозволяє обмежити максимальний струм, споживаний з мережі при підмиканні розглянутого джерела вторинного електроживлення. Далі, при протіканні струму через терморезистор останній розігрівається і його опір зменшується. Після запуску джерела живлення опір терморезистора практично не впливає на роботу схеми.

Фільтр імпульсних завад ***Ф3*** зображено на рис. 2.36, *б*.

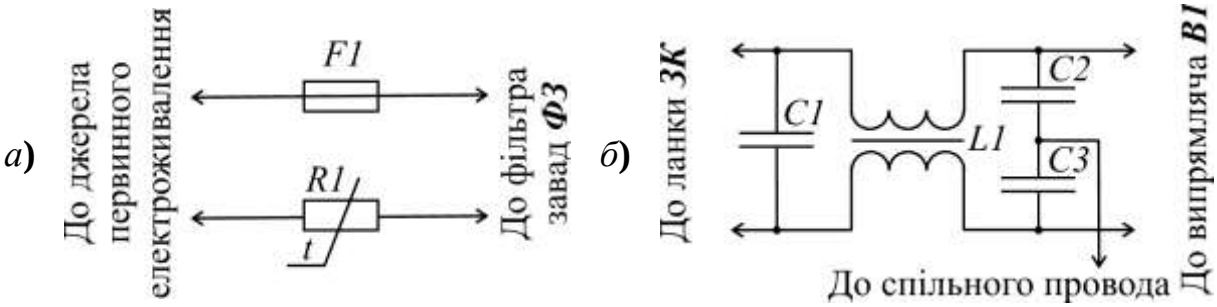


Рисунок 2.36 – Запобіжне коло ***ЗК*** (*а*) та фільтр ***Ф3*** імпульсних завад (*б*)

Він перешкоджає проходженню високочастотних імпульсних завад від джерела первинного електроживлення до джерела вторинного електроживлення ***БДВЕ***, а також завад, які виникають унаслідок роботи джерела ***БДВЕ***, до джерела первинного електроживлення.

Ланку постійного струму ***ЛПС1*** (вхідні випрямляч ***B1*** та згладжувальний фільтр ***Ф1***) – зображено на рис. 2.37. Випрямляч ***B1*** містить діоди ***VD1…VD4***. Його виконано за однофазною мостовою схемою. Випрямляч працює на ємнісне навантаження, тому що вхідний фільтр ***Ф1*** є ємнісним: утворений тільки конденсатором ***C4***. Резистор ***R2*** призначено для розряду конденсатора ***C4*** після вимикання джерела живлення ***БДВЕ*** від промислової мережі. На роботу схеми він практично не впливає, тому що є високоомним.

Інвертор ***I*** зображено на рис. 2.38. Його виконано за мостовою схемою.

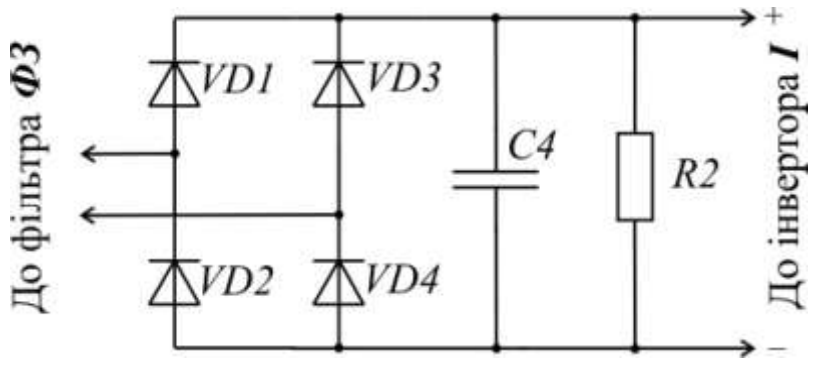


Рисунок 2.37 – Ланка постійного струму ***ЛПС1*** (вхідні випрямляч ***В1*** та згладжувальний фільтр ***Ф1***)

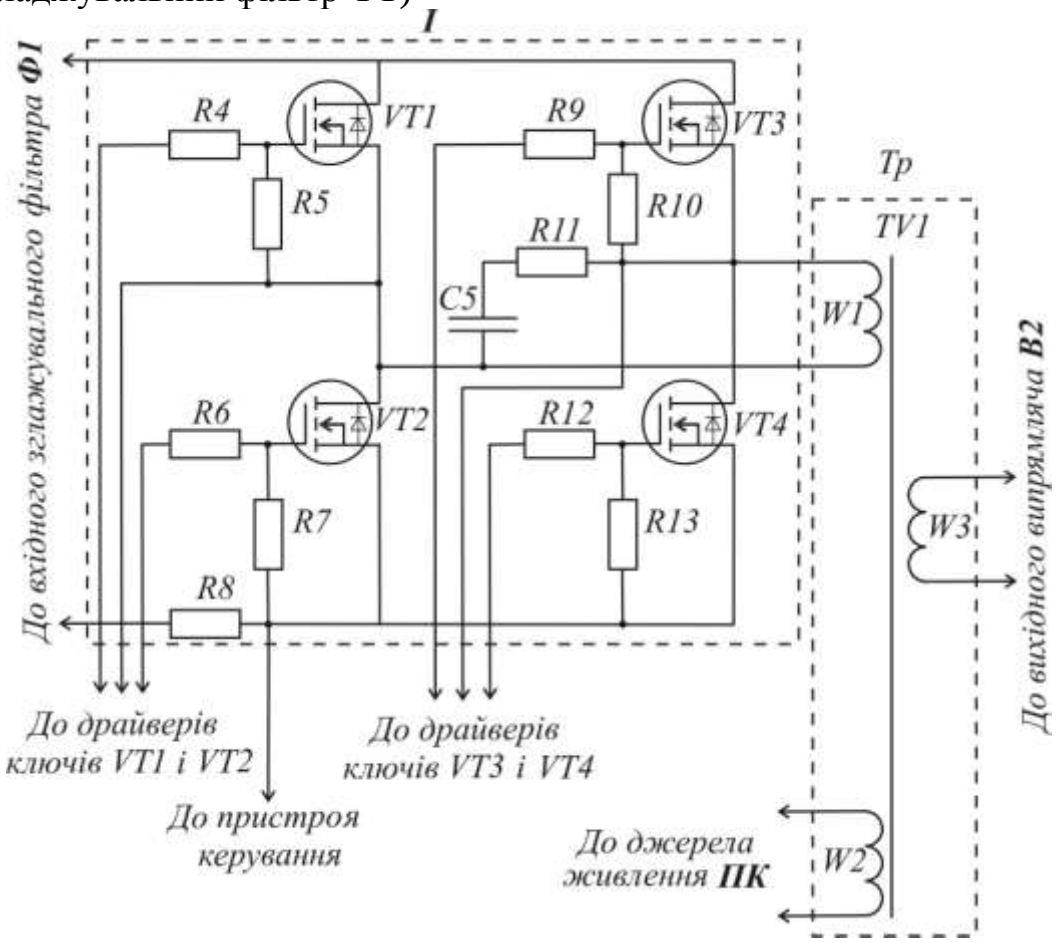


Рисунок 2.38 – Інвертор ***I***

Як силові ключі використовуються польові транзистори з ізольованим затвором (***MOSFET***) ***IRF840***. Коло ***R11***, ***C5*** є демпфіруючим і призначене для зменшення викидів напруги на стоках силових транзисторів внаслідок присутності в трансформаторі ***TV1*** індуктивностей розсіювання. Низькоомний резистор ***R8*** виконує функцію давача струму силових ключів. Формований на ньому сигнал надходить на пристрій керування ***ПК***. При цьому забезпечується вимикання силових транзисторів ***VT1…VT4*** у разі перевищення струму, який протікає через них, більш припустимого рівня.

Ланку постійного струму ***ЛПС2*** (вихідний випрямляч ***В2*** та вихідний згладжувальний фільтр ***Ф2***) – зображено на рис. 2.39. Випрямляч ***В2*** також (як і випрямляч ***В1***) побудовано за мостовою схемою випрямляння, але, на відміну від вхідного, працює на індуктивне навантаження. Як випрямні діоди доцільно використовувати високочастотні діоди Шотткі або діоди з дифузією золота. Цим досягається підвищення к. к. д. джерела ***БДВЕ***.

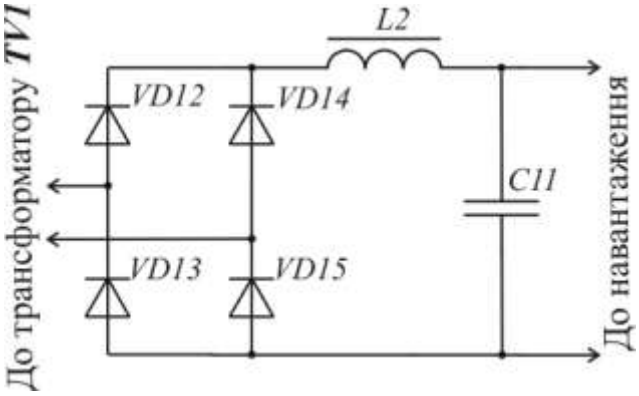


Рисунок 2.39 – Ланка постійного струму ***ЛПС2*** (вихідні випрямляч ***В2*** та згладжувальний фільтр ***Ф2***)

Пристрій керування ***ПК*** зображено на рис. 2.40. Його виконано на базі контролера **SG3524.** Аналогічні контролери випускають більшість провідних фірм з виробництва мікросхем, такі як *Motorola, Texas Instrument* та інші. У СНД аналогічна мікросхема має назву **К1114ЕУ1**. Діаграми роботи цієї мікросхеми зображено на рис. 2.41. Частота роботи генератора задається елементами ***R14, C6***. На конденсаторі ***C6*** формується пилкоподібна напруга $\boldsymbol{u_п(t)}$, необхідна для роботи ШІМ-компаратора. Елементи ***C7, R17*** перешкоджають самозбудженню мікросхеми на високих частотах.

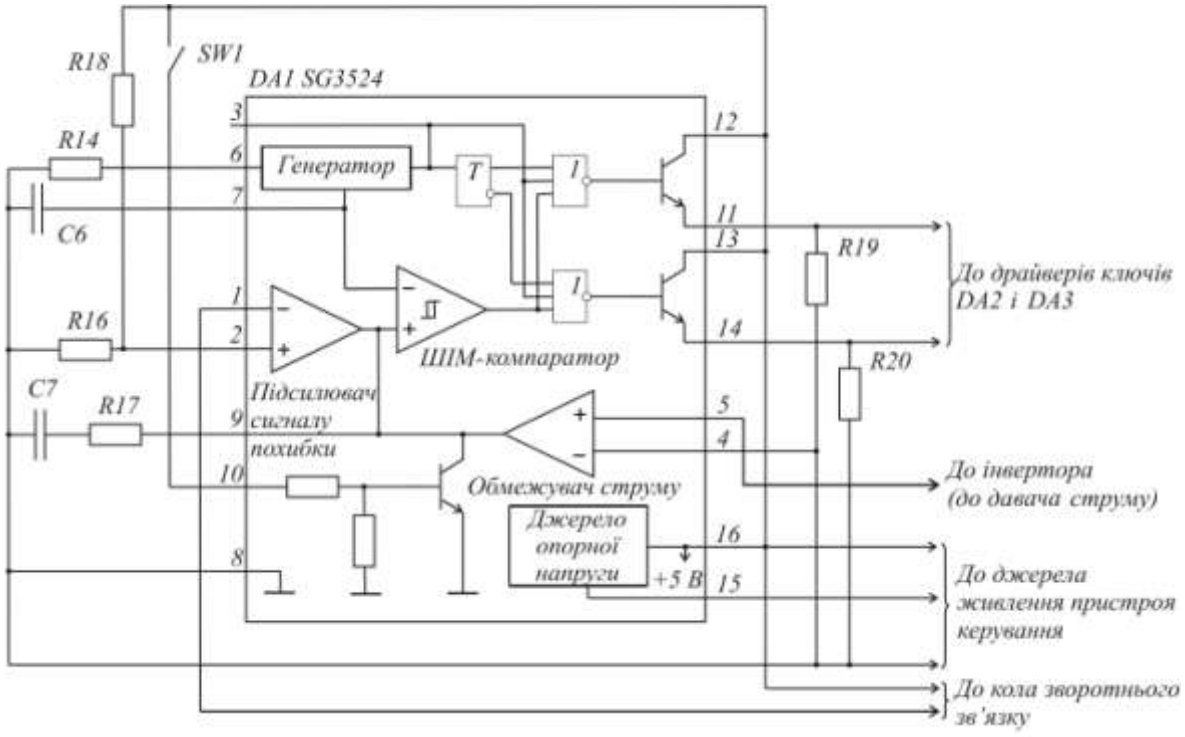


Рисунок 2.40 – Пристрій керування ***ПК***

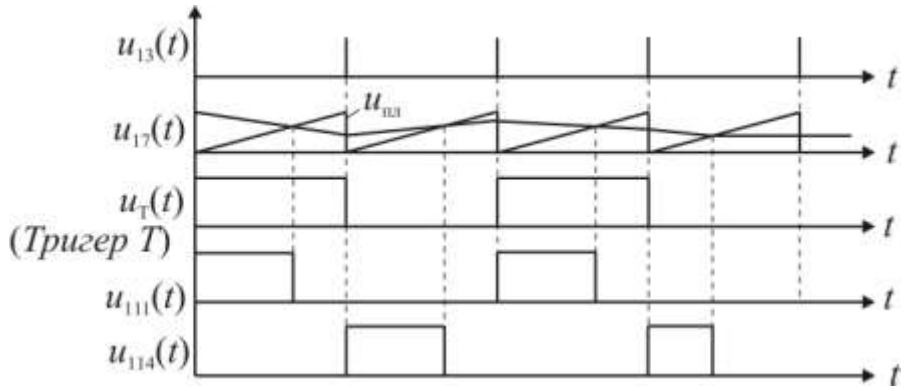


Рисунок 2.41– Діаграми роботи пристрою керування ***ПК***

Подільник напруги, утворений елементами ***R16, R18***, задає опорну напругу на неінвертувальному вході підсилювача сигналу помилки. Виходи підсилювача сигналу помилки та обмежувача струму поєднано в такий спосіб щоб рівень напруги на неінвертувальному вході ***ШІМ***-компаратора дорівнював найменшій з вихідних напруг зазначених підсилювачів. За допомогою ключа ***SW1*** забезпечується блокування мікросхеми (блокування відбувається при подаванні високого рівня на вивід *10*).

Резистори ***R19, R20*** є навантаженням вихідних транзисторів мікросхеми відповідно $\boldsymbol{u_{111}(t)}$ (вихід ***A***) і $\boldsymbol{u_{114}(t)}$ (вихід ***B***). Зазначені транзистори увімкнено за схемою зі спільним колектором. Від джерела опорної напруги ***ПК*** виробляється стабільна напруга **+5 В** для живлення як внутрішніх власних вузлів мікросхеми ***ПК***, так і для зовнішніх.

*Драйвери **Д** силових ключів інвертора **І*** потрібні для перетворювання малопотужних сигналів з виходу пристрою ***ПК*** на більш потужні сигнали, потрібні для керування силовими ключами інвертора ***І.*** Більш того, при цьому забезпечується й узгодження верхніх (за схемою) транзисторів ***VT1, VT3*** інвертора ***І,*** які перебувають під високим потенціалом. Зазвичай для цієї мети використовуються спеціальні сигнальні трансформатори. У даному джерелі живлення використовуються спеціалізовані мікросхеми драйверів **IR1201** (***DA2, DA3***) фірми *International rectifier*. Схему драйверів силових ключів зображено на рис. 2.42.

Для формування джерела живлення кола затвору верхніх (за схемою) транзисторів використовуються елементи ***VD6, C8*** (для ***DA2***) та ***VD7, C9*** (для ***DA3***). Схему з вихідними ключами драйвера ***Д*** та силовими ключами ***VT1, VT2*** інвертора ***І*** наведено на рис. 2.43.

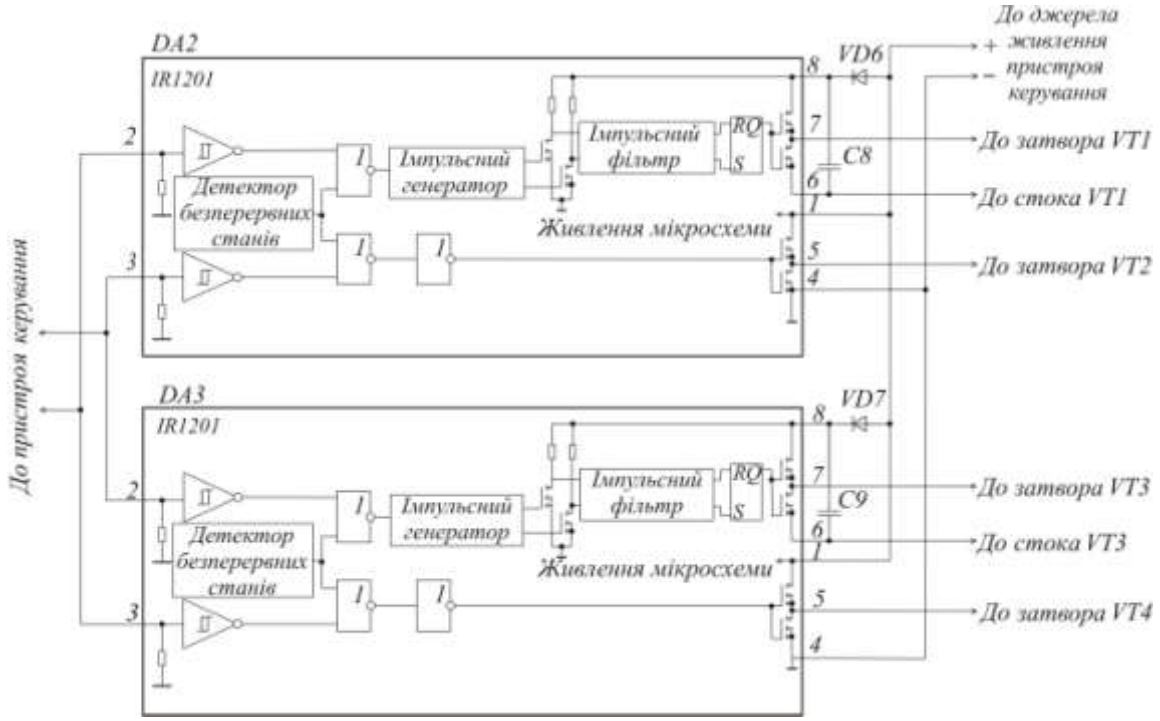


Рисунок 2.42 – Драйвери ***Д*** силових ключів інвертора ***І***

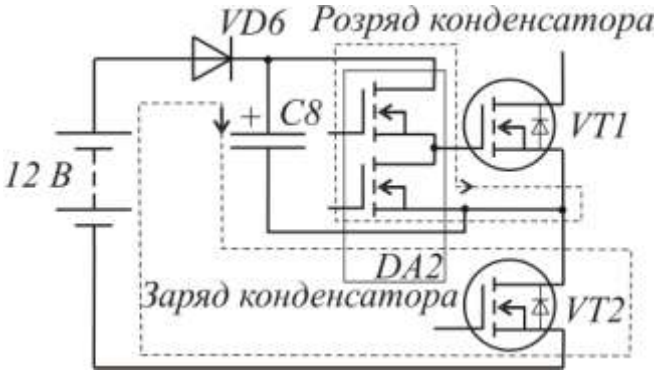


Рисунок 2.43 – До принципу роботи драйвера

При вмиканні нижнього силового транзистора ***VT2*** нижній (за схемою) вивід конденсатора ***C8*** підмикається до негативного виводу джерела **12 В** і забезпечується заряд (накопичення енергії) конденсатора ***C8*** до напруги джерела живлення драйвера **+12 В**. При переході до закритого непровідного стану нижнього силового транзистора ***VT2*** діод ***VD6*** переходить також до закритого непровідного стану – до нього прикладається зворотна напруга. Це перешкоджає розряджанню конденсатора ***C8***. Електрична енергія конденсатора ***C8*** (з напругою приблизно рівною напрузі джерела живлення драйвера) використовується для керування верхнім силовим транзистором ***VT1***. Отже, живлення кола затвору верхнього транзистора забезпечується за рахунок періодичного перезаряджання конденсатора ***C8***.

Це відновлюється щоразу при відкриванні нижнього силового транзистора ***VT2***.

Коло від'ємно зворотного зв'язку ***B33*** потрібне для передавання інформації про величину вихідної напруги $U_н$ кола навантаження джерела ***БДВЕ*** до пристрою керування ***ПК***. При цьому потрібне й забезпечення гальванічної розв'язки вхідних та вихідних кіл.

Схему цього вузла зображено на рис. 2.44. Гальванічна розв'язка

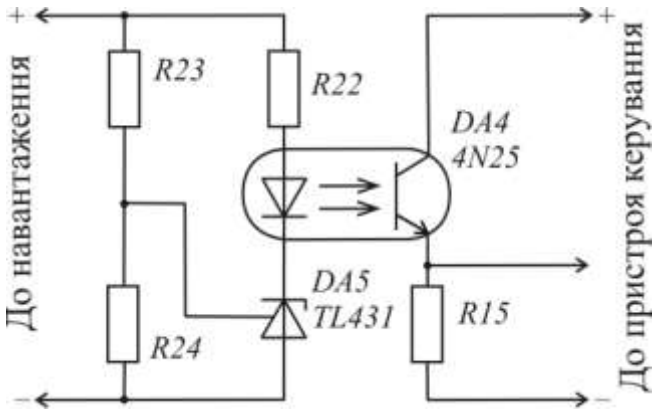


Рисунок 2.44 – Коло від'ємного зворотного зв'язку ***B33***

забезпечується оптопарою ***DA4***. Керований стабілітрон ***DA5*** **TL431** потрібен для забезпечення необхідної лінійності коефіцієнта передавання вузла.

Схему малопотужного джерела електроживлення ***ДВЕ*** пристрою керування ***ПК*** та драйверів ***Д*** зображено на рис. 2.45. Схема підмикається

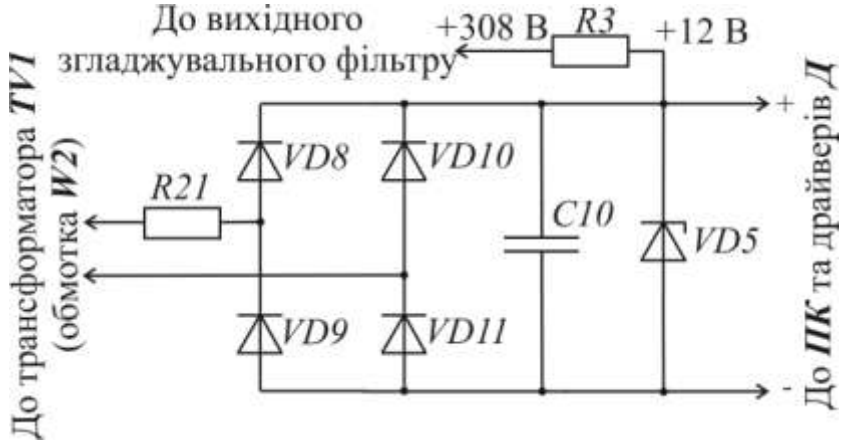


Рисунок 2.45 – Схема малопотужного ***ДВЕ***

до двох джерел напруги: до виходу вхідного згладжувального фільтра ***Ф1*** і до обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1***. При функціонуванні ***БДВЕ*** на виході згладжувального фільтра ***Ф1*** має місце постійна напруга порядку **+308 В.** На обмотці ***W2*** трансформатора ***TV1*** при цьому має місце змінна напруга

прямокутної форми з амплітудою порядку **24 В**. Основним джерелом живлення пристрою керування ***ПК*** та драйверів ***Д*** силових ключів є трансформатор ***TV1***. Електроживлення по колу +**308 В** використовується короткочасно – лише під час запуску.

Мікросхема пристрою керування ***ПК*** забезпечує споживання струму під час запуску незначної величини, і тому потужності, забезпечуваної колом **+308 В**, вистачає для запуску в роботу ***БДВЕ***. Після запуску, коли струм споживання мікросхеми пристрою керування збільшується, її електроживлення забезпечується від більш потужного джерела електричної енергії – від трансформатора ***TV1***. Стабілітрон ***VD5*** забезпечує обмеження вихідної напруги схеми. Вихідна напруга схеми малопотужного ***ДВЕ*** становить **+12 В.**

2.7 До дослідження пристроїв та систем електроживлення модульної структури (факультативна робота студентів – УДРС, НДРС)

На практиці в силовій перетворювальній техніці широко використовуються паралельні й послідовні сполучення, як на рівні окремих елементів, силових напівпровідникових приладів, так і на рівні складних пристроїв і систем. Основними причинами цього є обмеження щодо навантажувальної здатності елементів та пристроїв, прагнення до уніфікації й підвищення надійності тощо. І хоч би як оптимізувалися параметри елементної бази пристроїв та систем електроживлення, завжди існуватиме й потреба у більш широкій уніфікації пристроїв електроживлення, розширенні їхньої номенклатури й функціональних можливостей, обмеженні на максимальну частоту перетворювання, навантаження елементів за струмом, напругою, потужністю й т. ін.

2.7.1 Пристрої та системи модульної структури. Принципи побудови та функціонування

Давно відоме є виконування пристроїв силової перетворювальної техніки з кількох, меншої потужності (наприклад за паралельної роботи на спільне навантаження випрямлячів, перетворювачів постійної напруги, джерел вторинного електроживлення). Використання в них можливостей від’ємного зворотного зв'язку дозволяє ефективно розв’язувати проблему коефіцієнта використовування елементів за струмом, напругою та потужністю. У зв'язку з низьким коефіцієнтом використання кожного елемента

за струмом, напругою та потужністю (через технологічний розкид і нелінійність відповідних характеристик елементів) вихідна потужність пристрою з паралельним (послідовним) вмиканням однотипних елементів буде менше за потужність аналогічного, побудованого з окремих блоків з тих самих елементів, пристрою за паралельного (послідовного) вмикання блоків перетворювання.

Окрім збільшення навантажувальної здатності силових комутувальних елементів та пристроїв перетворювання, паралельне й послідовне сполучення забезпечує набуття таких позитивних властивостей:

- збільшення к.к.д. пристроїв шляхом використовування напівпровідникових пристроїв менш потужних, але таких, що мають більш оптимальні за потужні параметри й розвантаження їх за струмом;

- збільшення надійності за допомогою впровадження незначної надлишковості й відповідного резервування (впровадження резервної надлишковості за методом глибокого секціонування на рівні пристрою-модуля дозволяє за незначного збільшення ваги елементів перетворювача забезпечити необхідний рівень надійності);

- використання функціонально-вузлового методу конструювання, який дозволяє скоротити тривалість процесу розробляння й виготовляння за зменшення технологічних витрат на виробництво перетворювачів електричної енергії (паралельним і послідовним підмиканням уніфікованих і стандартних вузлів та пристроїв у вигляді окремих модулів досягається розширенням номенклатурного ряду комбінованих за потужністю та якістю електричної енергії пристроїв, систем електроживлення й електропостачання більшої потужності).

Отже шляхом поєднання великої кількості (***N***) однакових взаємозамінних силових каналів – модулів – можна реалізувати імпульсний перетворювач електричної енергії ***ПЕЕ*** модульної (матричної) структури значно більшої потужності із зазначеними вище позитивними властивостями. Такі перетворювачі ***ПЕЕ*** називають також багатосекційними. Використовувані в них силові канали (***СК***) являють собою самостійні функціонально завер-

шені пристрої – перетворювачі постійної напруги будь-якого відомого типу. Вхідні кола ***СК*** можуть під'єднувати паралельно або послідовно до первинного джерела, а вихідні – до навантаження.

На рис. 2.46 наведено деякі можливі варіанти структурної побудови ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення з такими перетворювачами. У табл. 2.2 подано основні типи (***y***) найбільш відомих технічних розв'язків перетворювачів постійної напруги, які можуть бути використані в якості ***СК*** більш потужних перетворювачів рис. 2.46 з гальванічним зв'язком вхідних і вихідних кіл (однотактні ***СК***: знижувальний (***y*** = 1), підвищувальний (***y*** = 2), полярно-інвертувальний (***y*** = 3)), з гальванічним розподілом (однотактні ***СК***: з прямим вмиканням діода (***y*** = 4), зі зворотним вмиканням діода (***y*** = 5); двотактні ***СК***: з виводом середньої точки трансформатора (***y*** = 6), мостовий (***y*** = 7), і півмостовий – (***y*** = 8)).

Система електроживлення рис. 2.46, *а* містить джерело *10* первинного електроживлення постійної напруги ***ДПЕ***, перетворювач постійної напруги – ***DC–DC*** конвертор (*DC–DC Converter*) ***12*** і навантаження ***14***. Система електроживлення рис. 2.46, *б* містить ***R*** (де ***R*** = 2, 3, …) джерел первинного електроживлення: ***10*(*1*), *10*(*2*)**, … ***10*(*R*)**, ***DC–DC*** конверторів: ***12*(*1*)**, ***12*(*2*)**, … ***12*(*R*)**, одне навантаження *14*. Система електроживлення рис. 2.46, *в* містить одне джерело первинного електроживлення ***10***, ***P DC–DC*** конверторів: ***12*(*1*), *12*(*2*)**, … ***12*(*P*)** і ***P*** навантажень: ***14*(*1*)**, ***14*(*2*)**, … ***14*(*P*)**.

У загальному випадку ***DC–DC*** *Converters 12* може бути виконано у вигляді традиційних перетворювачів постійної напруги з однофазним принципом перетворювання електричної енергії. При цьому кожний з ***DC–DC*** *Converters 12* рис. 2.46 має один імпульсний канал, який перетворює й регулює електричну енергію джерела первинного електроживлення *10* на енергію з параметрами, необхідними для навантаження *14*.

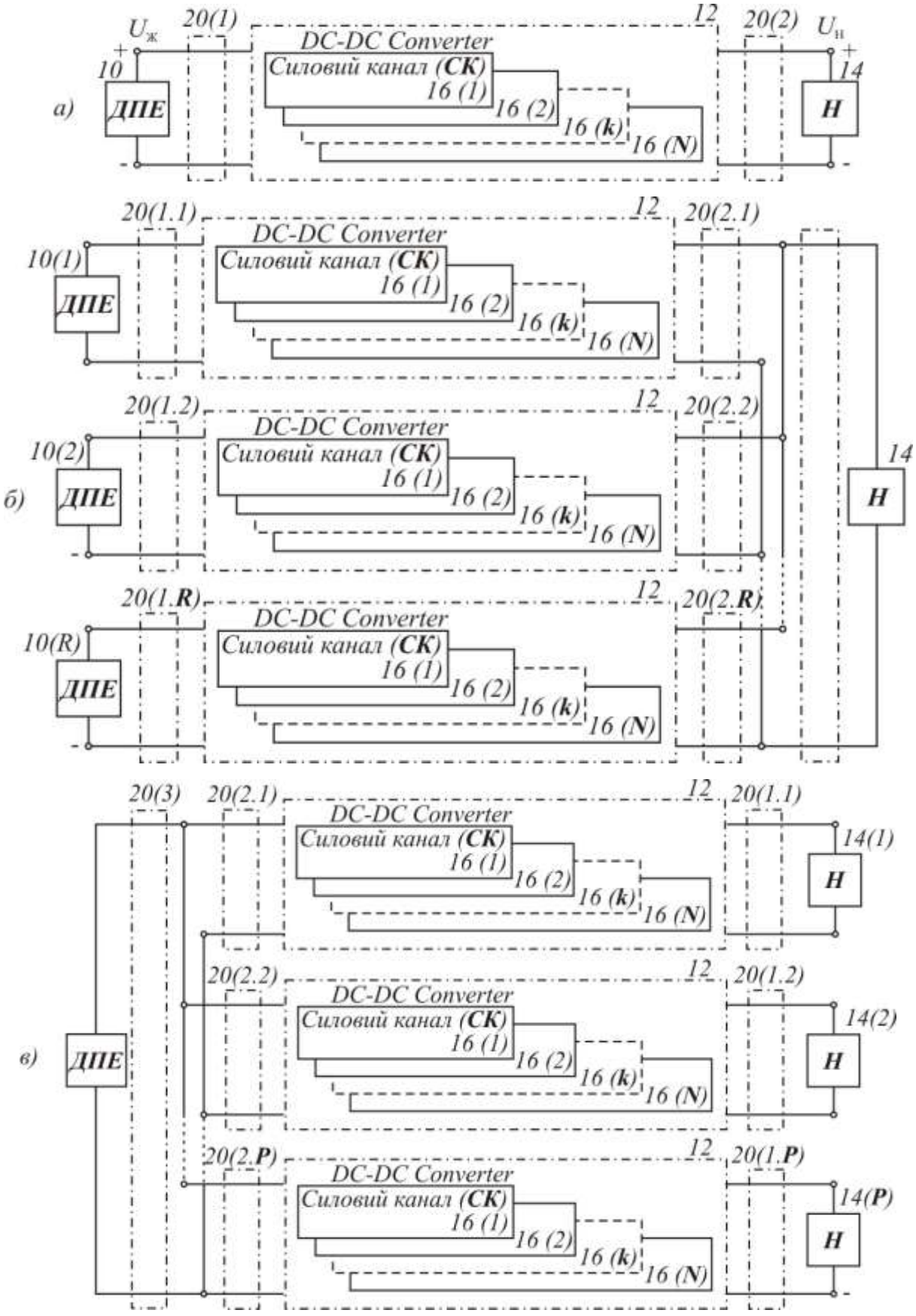
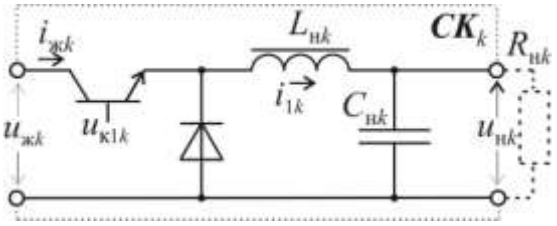
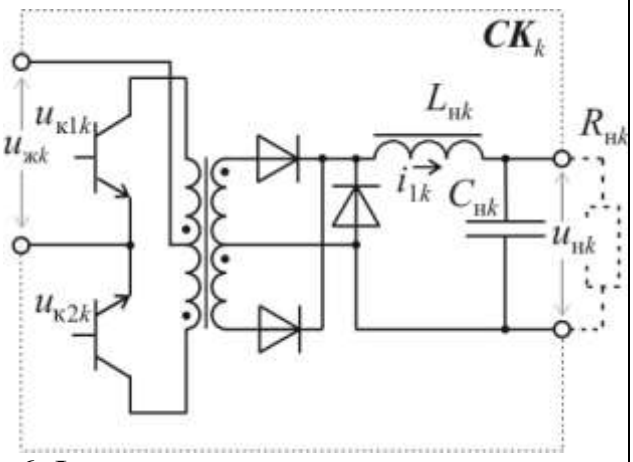
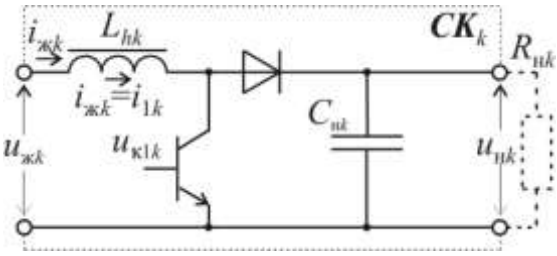
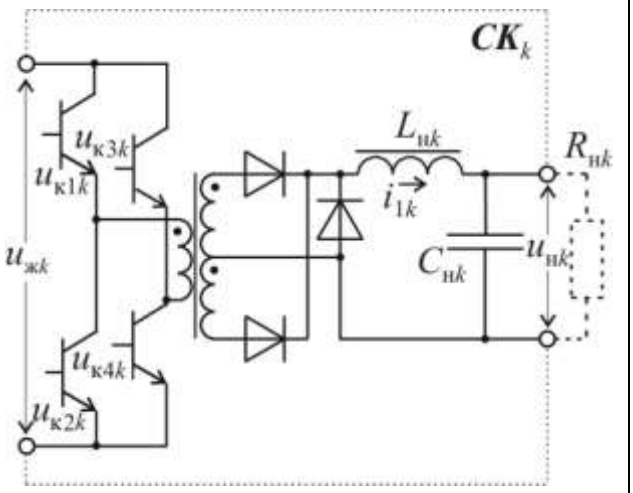
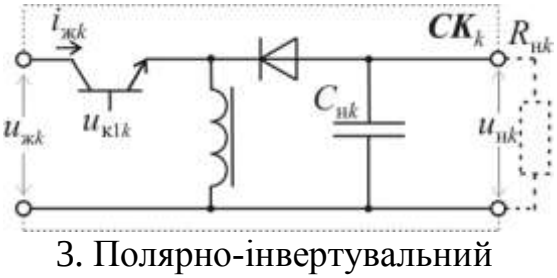
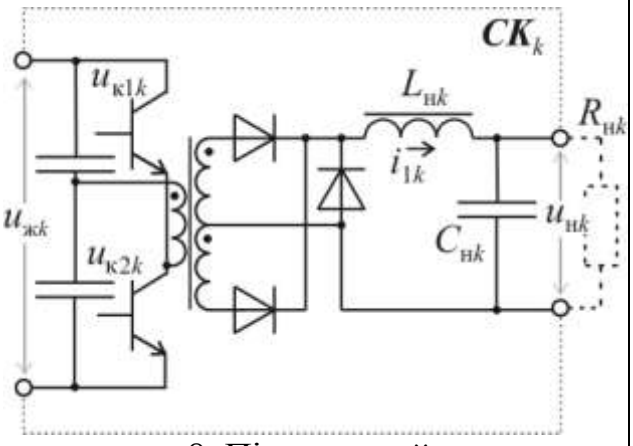
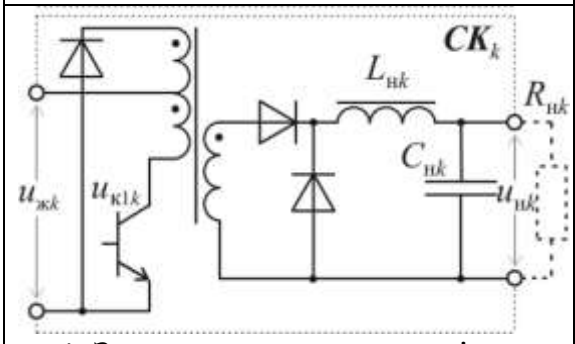
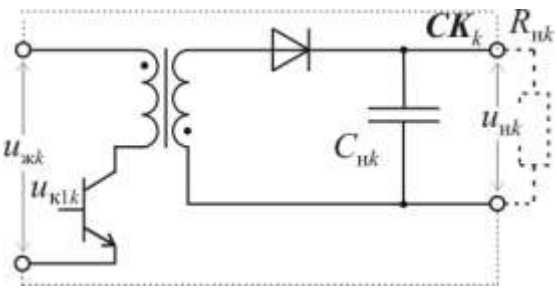


Рисунок 2.46 – Структурні схеми систем електроживлення

Таблиця 2.2 – **Силові канали імпульсних перетворювачів модульної структури**

Однотактні	**Двотактні**
 1. Знижувальний	 6. Із виводом середньої точки трансформатора
 2. Підвищувальний	 7. Мостовий
 3. Полярно-інвертувальний	 8. Півмостовий
 4. З прямим вмиканням діода	
 5. Зі зворотним вмиканням діода	

На рис. 2.47 наведено системи електроживлення з ***DC–DC Converters 12***. Кожна з них містить велике число (***N***) однакових взаємозалежних силових каналів (***СК***): ***16(1), 16(2), … 16(N)***. З силових каналів ***16(1), 16(2), … 16(N)*** модулів реалізується ***DC–DC Converter 12*** – імпульсний перетворювач модульної (матричної) структури значно більшої потужності з низкою позитивних властивостей: збільшеною навантажувальною здатністю силових комутувальних елементів, високим коефіцієнтом корисної дії, надійністю, технологічністю. При цьому збільшення загального діапазону функціонування системи електроживлення за струмом, потужністю та напругою досягається шляхом підмикання додаткових модулів, а зменшення тимчасового показника недієздатності енергосистеми – за рахунок швидкої заміни ушкодженого модуля.

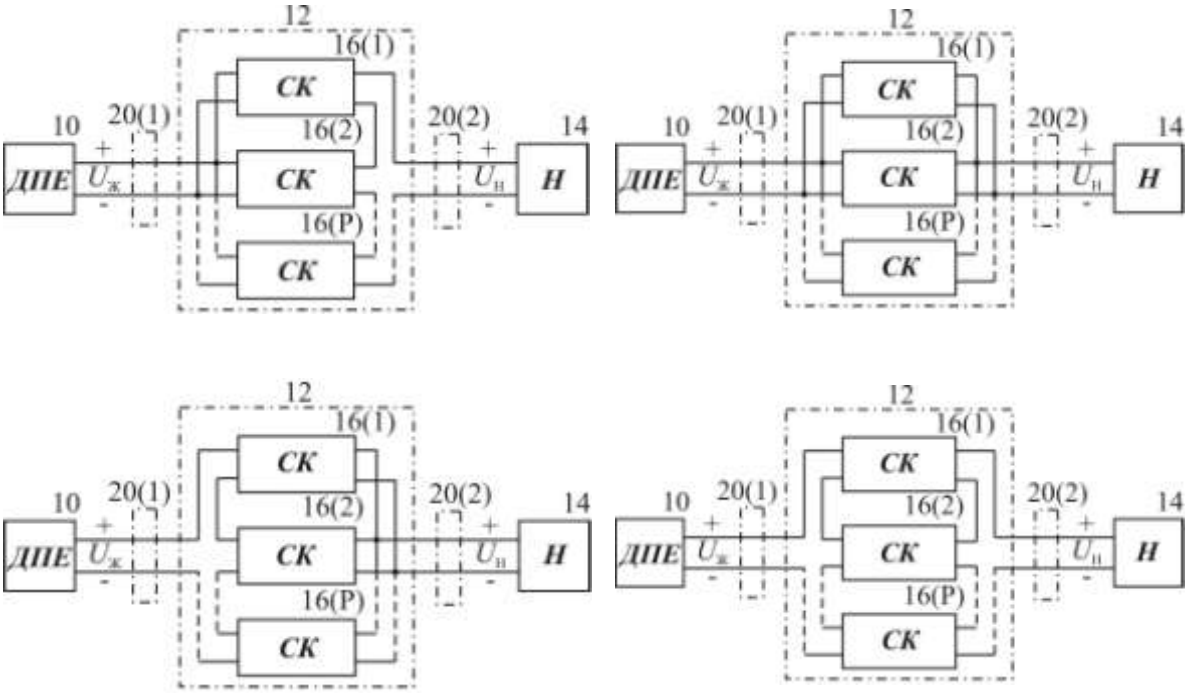


Рисунок 2.47 – Варіанти вмикання вхідних та вихідних кіл силових каналів в ***DC–DC Converters*** модульної структури

Використовувані в ***DC–DC Converters 12*** силові канали являють собою самостійні функціонально завершені пристрої – перетворювачі постійної напруги будь-якого відомого типу, із застосуванням кожної з відомих схем одно- та двотактних конвертерів постійної напруги, застосовуваних в однофазних пристроях з імпульсним перетворюванням електричної енергії.

Вхідні кола силових каналів ***16*** можуть підмикатися (рис. 2.47) паралельно або послідовно щодо первинного джерела електроживлення ***10,*** а вихідні – до навантаження ***14.***

2.7.2 Особливості електричних процесів пристроїв та систем модульної структури

Розрізняють асинхронне, синфазне й багатофазне функціонування ***СК*** у структурах, показаних на рис.2.45, 2.46 та 2.47.

Асинхронне функціонування характеризується відсутністю "прив'язки" електричних процесів у ***СК*** до єдиної опорної частоти. Внаслідок цього в колах навантаження й живлення з'являються низькочастотні биття напруги (струму), що утруднює їхню фільтрацію, призводить до збільшення габаритів та маси згладжувальних фільтрів.

За однофазного режиму роботи перетворювача модульної структури – ***ОІП DC–DC*** *Converters 10* (за синфазної роботи силових каналів *16* рис. 2.48, *а*) силові канали *16* комутуються одночасно і електричні процеси (струми, напруги, потужності) в однотипних елементах схеми є синхронні та синфазні а часовий зсув поміж ними є відсутній: $\Delta t_к = 0$.

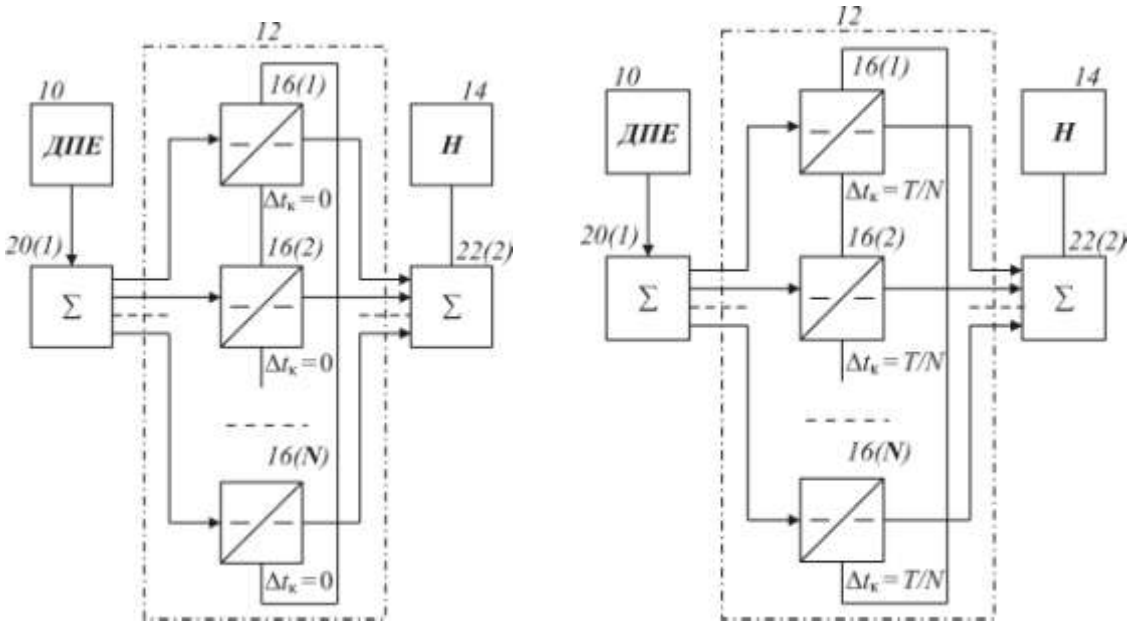


Рисунок 2.48 – Структурні схеми ***DC–DC*** *Converters* з однофазним (*а*) та багатофазним (*б*) принципом перетворювання електричної енергії

Наприклад, для схем рис. 2.47 та 2.48 струми у вхідних *20*(*1*) ($i_{ж1}$, $i_{ж2}$ … $i_{жN}$) та вихідних *20*(*2*) колах ($i_{н1}$, $i_{н2}$ … $i_{нN}$) складаються і мають в ***N*** разів більші постійні (відповідно $I_ж$, $I_н$) та змінні $\Delta I_ж$, $\Delta I_н$ складові (рис. 2.49, *б* та *г* відповідно), чим однойменні складові струмів в окремо взятому $\Delta I_{жk}$, $\Delta I_{нk}$ ***k***-тому силовому каналі (***k*** = **1, 2 …** ***N***, де ***k*** – номер силового каналу).

Зберігання параметрів електричних процесів в окремо взятому силовому каналі незмінними (рис. 2.49), але зміщеними відносно один одного в часі призводить до істотного змінювання процесів (струмів: $i_{бж}(t)$, $i_{бж}(t)$ – рис. 2.49, *в*, *д*) на вході *20*(*1*) і виході *20*(*2*) ***DC–DC*** *Converters 12* – у спільних колах протікання електричних процесів.

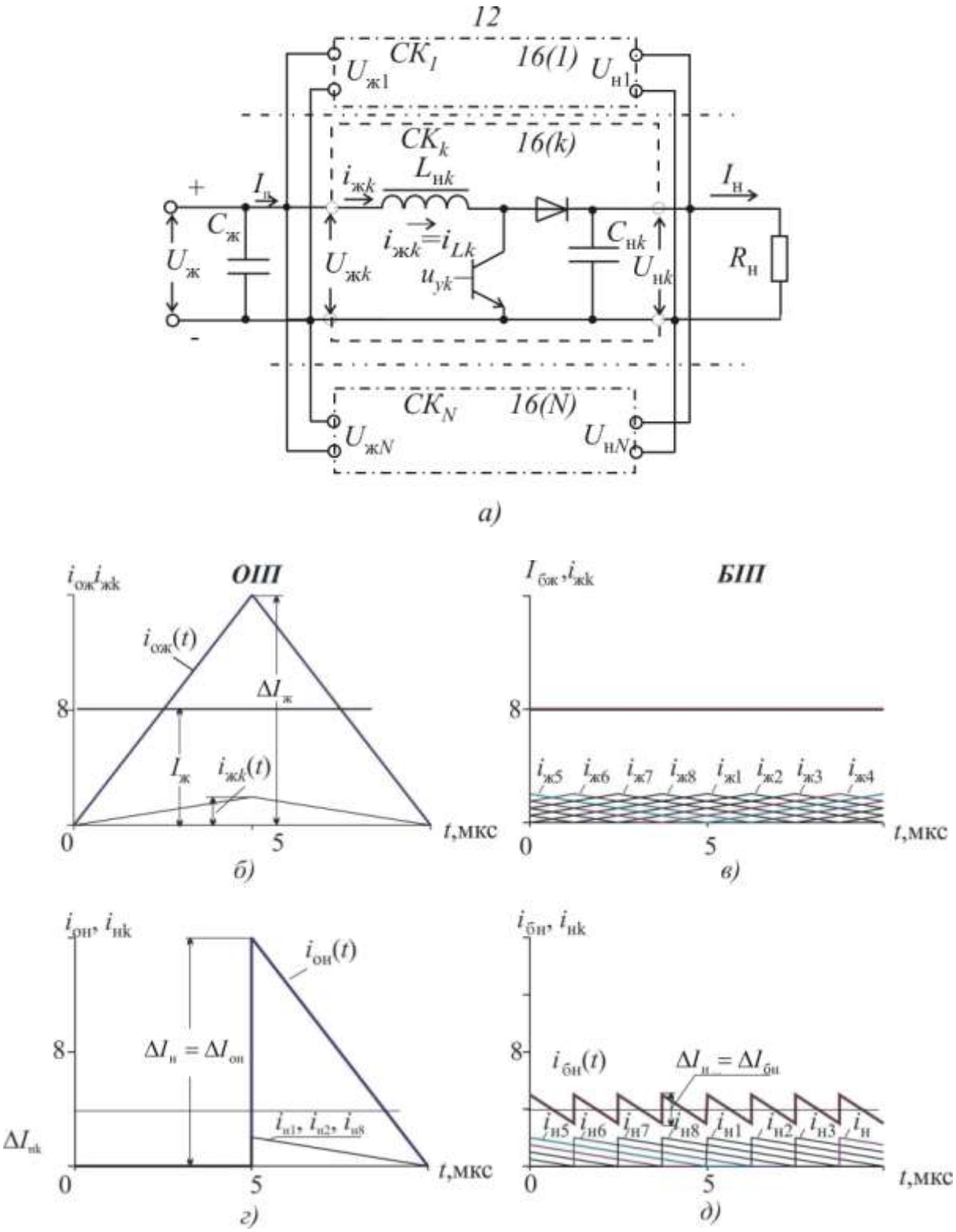


Рисунок 2.49 До принципів перетворення електричної енергії ***DC–DC Converters*** модульної структури на базі силових каналів підвищувального типу з ШІМ регулюванням: структурна схема (*а*); діаграми з однофазним (*б, г*) та багатофазним (*в, д*) принципами перетворювання

Струми, споживані від джерела первинного електроживлення *10*, наприклад по колах на вході *20*(*1*) й на виході *20*(*2*) ***DC–DC Converter 12*** (відповідно $\boldsymbol{i_{бж}(t)}$, $\boldsymbol{i_{бн}(t)}$) мають істотно менший рівень змінної складової. Більше того, частота пульсацій збільшується в *N* разів, а їхній рівень може бути нульовим (рис. 2.49, *в*). Підсумовування в колах *20* зміщених у часі електричних процесів має ефект фільтрації (див. рис. 2.49, *в,д*). І відбувається це не за рахунок збільшення частоти перетворювання або (та) підвищення параметрів згладжувальних фільтрів.

Проілюструємо це на прикладі ***DC–DC Converter*** схеми рис. 2.49, *а* й залежностей рис. 2.50, які відбивають особливості його роботи за однофазного й багатофазного принципів перетворювання. За однофазного принципу перетворювання електричної енергії в ***DC–DC Converter***, виконаному відповідно до рис. 2.49, *а*, силові канали *16* комутируються одночасно й електричні процеси в однотипних елементах схеми є синхронні й синфазні (див. рис. 2.49, *б*, *г*).

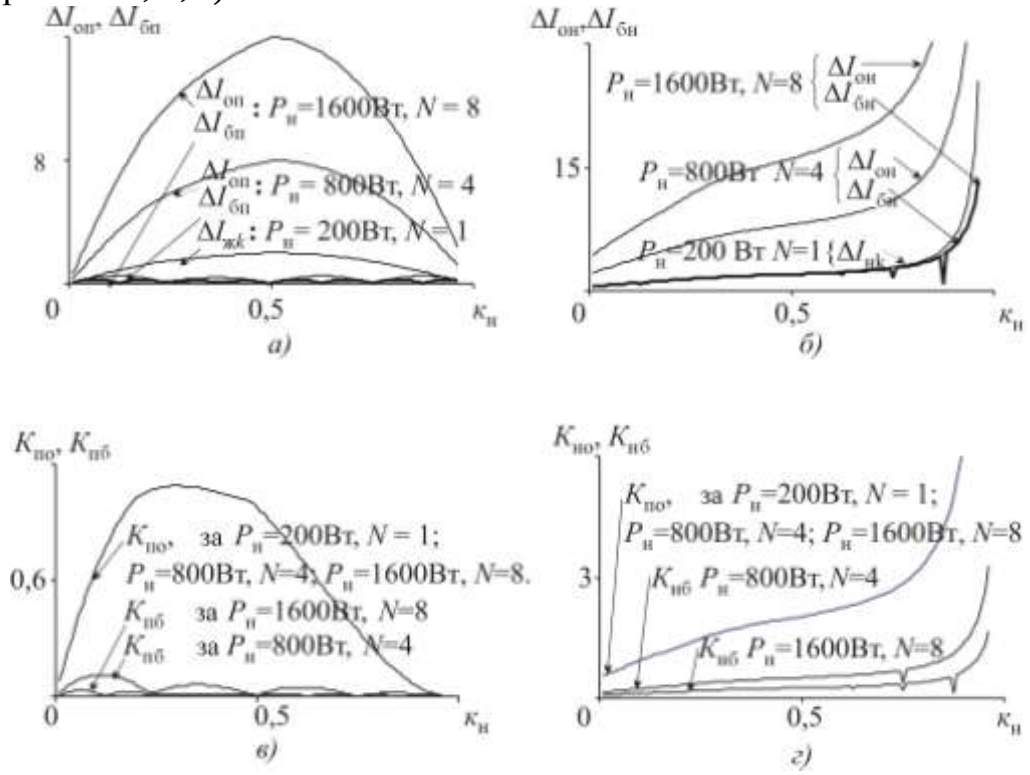


Рисунок 2.50 – Залежності від коефіцієнта заповнення розмаху пульсації струмів на вході (*а*) і виході (*б*) та коефіцієнтів пульсацій на вході (*в*) і виході (*г*) відповідно за однофазного $\boldsymbol{I_{ож}}$, $\boldsymbol{I_{он}}$ ($\boldsymbol{K_{жо}}$, $\boldsymbol{K_{но}}$) та багатофазного $\boldsymbol{I_{бж}}$, $\boldsymbol{I_{бн}}$ ($\boldsymbol{K_{жн}}$, $\boldsymbol{K_{нб}}$) принципах перетворювання для $\boldsymbol{L_{нк}}$ = 500 мкГн, $\boldsymbol{U_{нк}}$= 400 В

При зберіганні незмінної потужності в колі *20* навантаження в окремо взятому силовому каналі *16*, рівної 200 Вт, збільшення кількості силових каналів до $\boldsymbol{N}$ = 4 ($\boldsymbol{P_н}$ = 800 Вт), $\boldsymbol{N}$ = 8 ($\boldsymbol{P_н}$ = 1600 Вт) призводить до збі-

льшення пропорційно пульсації струмів на вході $\Delta I_{ж} = \Delta I_{ож} = I_{оп}$ (див. рис. 2.50, *а*) та виході $\Delta I_{н} = \Delta I_{он}$ (див. рис. 2.50, *б*).

Зберігання параметрів електричних процесів в окремо взятих силових каналах *16* незмінними, але зміщеними (рис. 2.49, *г*, *д*) один відносно одного в часі призводить до істотного змінювання процесів на вході $i_{бж}(t)$ (рис. 2.49, *в*) і виході (рис. 2.49, *г*). Зі збільшенням числа N силових модулів *16* відбувається збільшення вихідної потужності ***DC–DC Converter 12*** до 800 Вт (за $N = 4$), до 1600 Вт (за $N = 8$) (див. рис. 2.50). При цьому рівні змінних складових струмів на вході $\Delta I_{бж} = \Delta I_{бп}$ (рис. 2.50, *а*) не тільки не збільшуються, а зменшуються, навіть порівняно з рівнями змінних складових $\Delta I_{жk}$, споживаних окремо взятими силовими каналами 16. Рівні змінних складових струмів на виході $\Delta I_{бж}$ зі збільшенням кількості силових каналів ($N = 4, 8$ – рис. 2.50, *б*) залишаються незмінними, такими що дорівнюють змінній складовій струму $\Delta I_{жk}$ окремо взятого силового каналу *16*. Окрім того, за багатофазного принципу перетворювання електричної енергії відбувається й збільшення частоти пульсації в N разів. І відбувається це не за рахунок збільшення частоти перетворювання в окремо взятих силових каналах *16*. Для розглянутого ***DC–DC Converter*** на рис. 2.50, *в*, *г* наведено залежності коефіцієнтів пульсації на вході ($K_{жо}$ та $K_{жб}$) і виході ($K_{но}$, $K_{нб}$) – відповідно для однофазного й багатофазного принципів перетворювання електричної енергії.

Ефективність фільтрації змінної складової (у колах *20*) у перетворювачах з багатофазним принципом перетворювання залежить від симетрії електричних процесів у силових каналах. Тут термін "*симетрія електричних процесів*" вживається для позначання ідентичності електричних процесів в окремо взятих силових каналах та їхнього рівномірного зсуву в часі відносно один одного.

При відхиленні одного з параметрів в одному силовому каналі (наприклад у другому силовому каналі – рис. 2.51: струму навантаження $\Delta I_{н2}$, індуктивності $\Delta L_{н2}$ дроселя силового згладжувального фільтра, часового зсуву $\Delta t_{с2}$ і напруги $\Delta U_{ж2}$ джерела первинного живлення) за зберігання параметрів решти силових каналів (першого, третього та четвертого) ідентичними й відповідними ідеальному випадку змінюється характер електричних процесів у спільних колах *20* (див. рис. 2.46, *а*) підсумовування струмів (напруг) окремо взятих силових каналів.

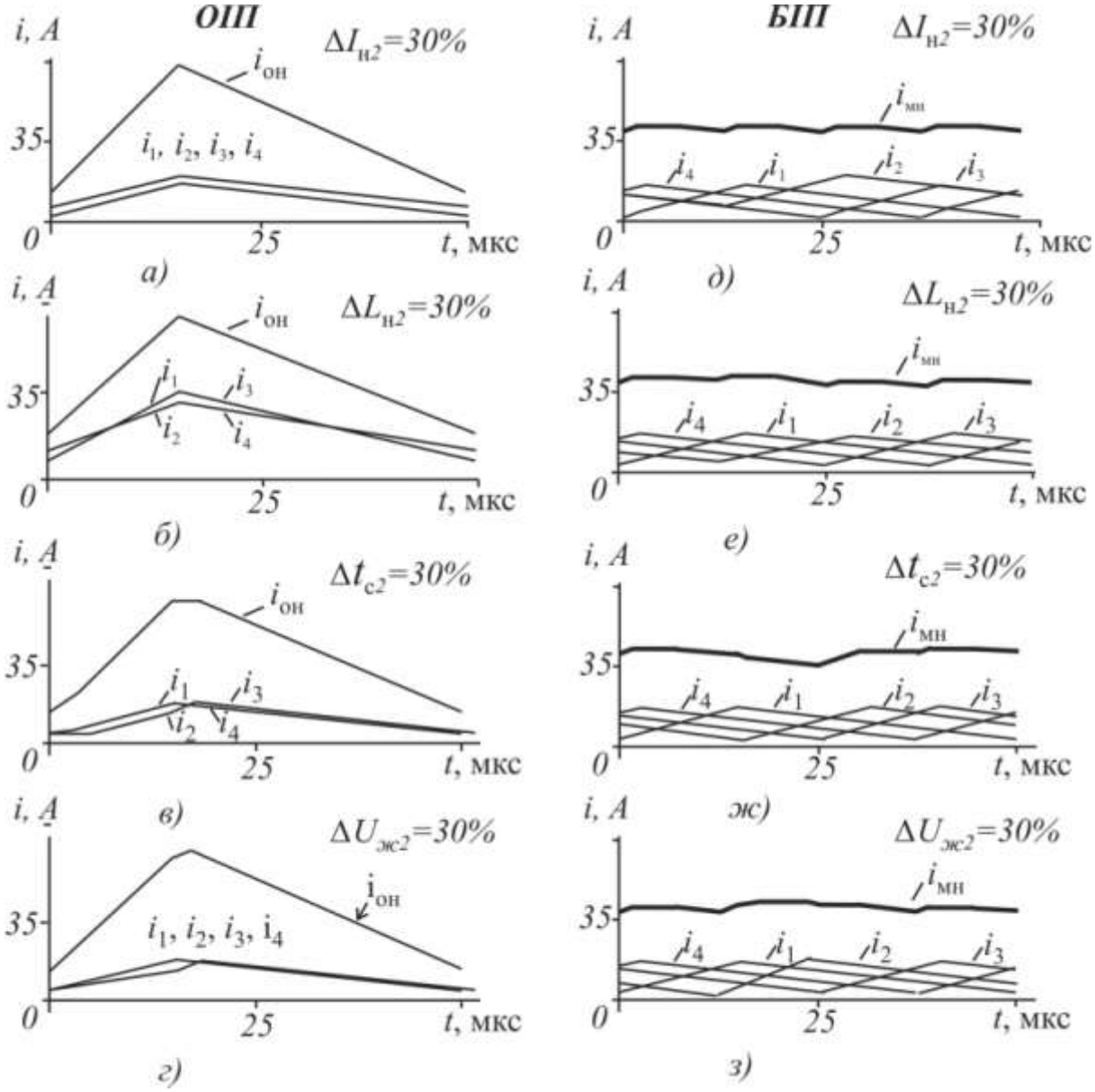


Рисунок 2.51 – Діаграми, які ілюструють характер електромагнітних процесів в ***DC–DC Converters*** модульної структури з однофазним (***ОІП***) та багатофазним (***БІП***) принципами перетворювання з кількістю силових каналів $N = 4$ за відхилення на 30 %, у силовому каналі №2: струму навантаження (*а* – ***ОІП***, *д* – ***БІП***), індуктивності $L_{н2}$ (*б* – ***ОІП***, *е* – ***БІП***), часового зсуву $\Delta t_{с2}$ (*в* – ***ОІП***, *ж* – ***БІП***) та напруги $U_{ж2}$ первинного джерела живлення (*г* – ***ОІП***, *з* – ***БІП***)

З аналізу електромагнітних процесів (рис. 2.50) випливає, що й за їхніх відхилянь від ідеального випадку багатофазний принцип перетворювання електричної енергії зберігає переваги порівняно з однофазним. Однак це призводить до збільшення рівня змінної складової. Причому це збільшення відбувається на частоті перетворювання окремо взятого силового каналу, тобто частоті в N разів нижчої за частоту пульсації, що відповідає

ідеальному випадку у вхідних та вихідних колах перетворювачів модульної структури.

Результати спектрального аналізу, подані на рис. 2.52, підтверджують це. За ідентичних параметрів силових каналів за $N = 8$ за однофазного принципу перетворювання електричної енергії ($\Delta t_{ck} = 0$) максимальний коефіцієнт пульсації відповідає першій гармоніці (рис. 2.51, *а*).

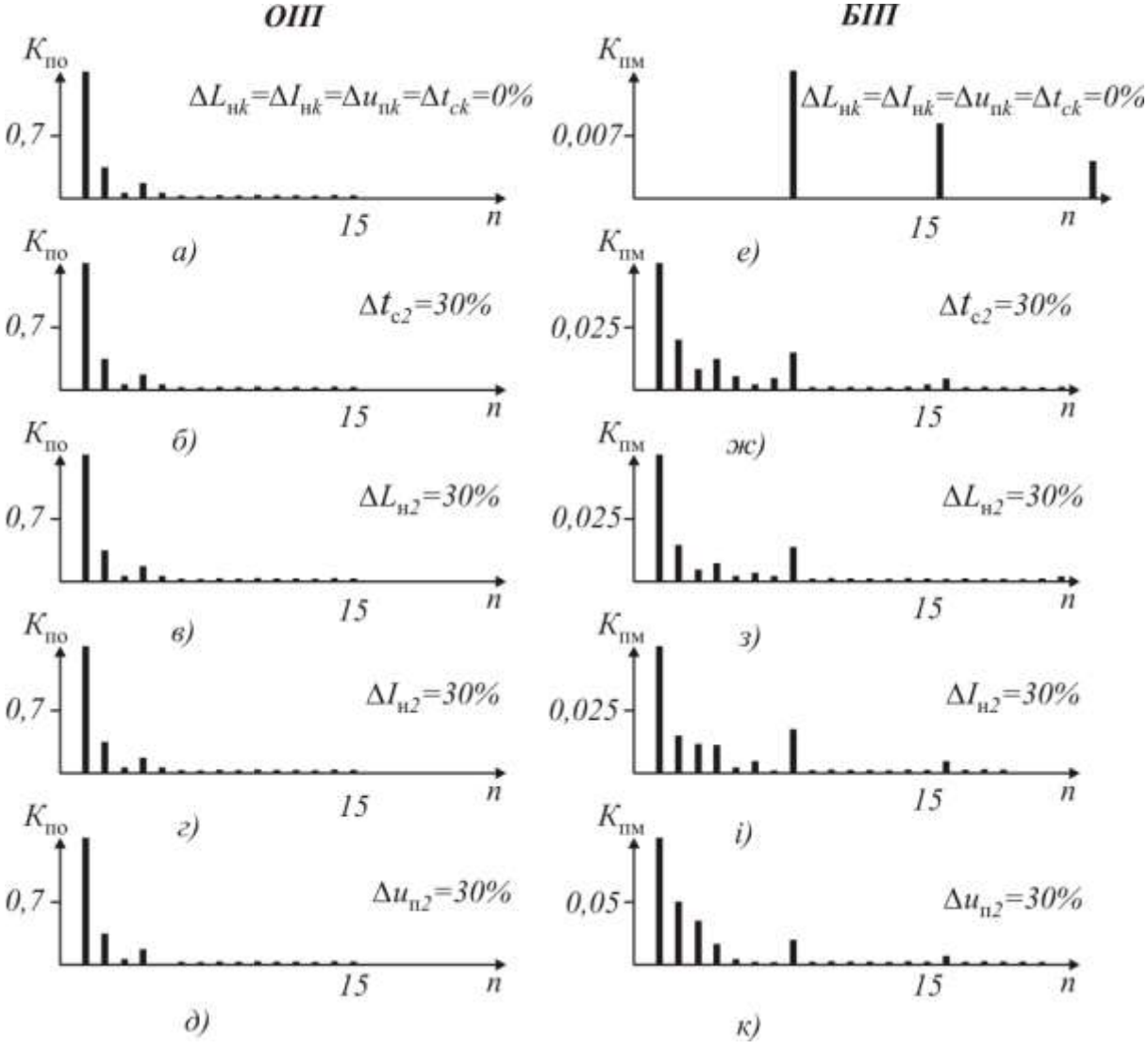


Рисунок 2.52 – Амплітудні спектри (коефіцієнтів пульсацій), які ілюструють процеси за однофазного (***ОІП*** *а, б, в ,г, д*,) та багатофазного (***БІП*** *е, ж, з, і, к*,) принципів перетворювання електричної енергії за симетрії (*а*, *е*) та асиметрії (*б*, *в*, *г*, *д*, *ж*, *з*, *і*, *к*)

За багатофазного принципу перетворювання забезпечується зменшення гармонічних складових, не рівних mN ($m = 0, 1, 2, \ldots$) – рис. 2.52, *е*: за $N = 8$ мають місце гармонічні складові $n = 8$, $n = 16$, $n = 24$, … з рівнями, істотно меншими ніж при однофазному принципу перетворювання. Вочевидь, що перша гармонічна складова на частоті перетворювання є відсутня. Більш то-

го, відсутні й гармонічні складові аж до ***N***-ої гармоніки, тобто перша, друга, третя … (***N*** – 1)-я. Не потрібні на їхнє фільтрування й витрати реактивних елементів (наприклад дроселів $\boldsymbol{L}_{\text{н}k}$, конденсаторів $\boldsymbol{C}_{\text{н}k}$) згладжувальних фільтрів, в *k*-тих силових каналах. Їхнє фільтрування забезпечується за рахунок переходу до багатофазного принципу перетворювання без збільшення об'єму й маси реактивних елементів згладжувальних фільтрів.

За асиметрії у спектральному складі сумарних електричних процесів з'являються складові на частоті перетворювання (рис. 2.52, *ж*, *з*, *і*, *к*). Однак їхній рівень є істотно менше ніж при однофазному принципу перетворювання (див. рис. 2.52: *ж* та *б, з* та *в, і* та *г, к* та *д*).

Отже, забезпечення ідентичності електричних процесів у силових каналах *16* не є обов'язковою вимогою для здобуття самого ефекту фільтрування змінних складових, але впливає на кінцевий результат.

Необхідною умовою здобуття ефекту фільтрування є зсув у часі один відносно одного електричних процесів силових каналів. Однак ця умова є необхідною, але недостатньою. Це можна засвідчити на таких прикладах.

Багатофазний режим функціонування системи електроживлення, який виконує функції суматора потужності кількох джерел первинного електроживлення, забезпечується в схемі рис. 2.46, *б*.

Забезпечення часового зсуву поміж електричними процесами, як в окремо взятих ***R*** групах силових каналів *16*(*1*), *16*(*2*), … *16*(***M***), так і поміж групами силових каналів, дозволяє зреалізовувати багатофазний режим функціонування:

- з підсумовуванням по ***M*** зсунутих у часі електричних процесів:
  – у вихідних колах *20*(*1*), *20*(*2*), … *20* (*R*);
  – у вхідних *20*(*1*), *20*(*2*), … *20*(*R*) і вихідних *20*(*2.1*), *20*(*2.2*), … 20 (*2.R*) відповідно *12*(*1*), *12*(*2*), … *12*(*R*) ***DC–DC*** *Converter*;
- з підсумовуванням ***N = RM*** електричних процесів, зсунутих у часі:
  – у вхідних колах *20*(*3*) навантаження *14*.

Якщо зберегти часовий зсув електричних процесів поміж окремо взятими групами силових каналів, а в самих групах (першої, другої ... ***R***-ої) перейти на синфазний режим роботи силових каналів, то для вхідних кіл *20*(*3*) навантаження *14* збережеться багатофазний режим роботи з підсумовуванням ***R*** електричних процесів ***R DC–DC*** *Converters 12*, а для вхідних *20*(*1*) і вихідних *20*(*2*) кіл ***DC–DC*** *Converters 12*(*1*), *12*(*2*), … *12*(***R***) матиме місце однофазний режим роботи.

При забезпеченні в схемі рис. 2.46, *в* багатофазного режиму роботи у вхідних *20*(*1*) колах у кожному з ***DC–DC*** *Converters 12*(*1*), *12*(*2*), … *12*(***P***), у їхніх вхідних *20*(*2.44*), *20*(*2.45*), … *20*(*2.**P***) та вихідних *20*(*2.1*), *20*(*2.2*), … 20(*2.**P***) колах (відповідно й у колах навантажень *14*(*1*), *14*(*2*), … *14*(***P***)) забезпечиться багатофазний режим підсумовування електричних процесів (наприклад струмів) окремо взятих ***M*** силових каналів *16*.

При цьому у вихідних колах джерела первинного електроживлення *10* забезпечується багатофазний принцип перетворювання з підсумовуванням електричних процесів ***N = PM*** окремо взятих силових каналів *16*.

Якщо перейти на синфазний режим роботи силових каналів *16* в окремо взятих групах і зберегти часовий зсув в часі електричних процесів поміж окремими групами силових каналів, то для вихідних кіл *20*(*3*) джерела первинного електроживлення *14* матиме місце багатофазний принцип протікання електричних процесів і ефект зменшення змінних складових без збільшення частоти перетворювання в окремо взятих ***DC-DC*** *Converters 12* і параметрів згладжувальних фільтрів. Незважаючи на те, що поміж електричними процесами окремо взятих груп силових каналів *16* має місце зсув у часі, у вихідних колах *20*(*2.1*), *20*(*2.2*), … *20*(*2.**P***) такої системи електроживлення (у навантаженнях – *14*(*1*), *14*(*2*), ... *14*(***P***)) відбуваються процеси, характерні для окремо взятого однофазного імпульсного перетворювача, і ефект фільтрації буде відсутній. Причиною цього є той факт, що в зазначених колах відбувається підсумовування синфазних, а не зсунутих у часі процесів.

Отже, для реалізації багатофазного принципу перетворювання електричної енергії постійної напруги у пристроях та системах, які здійснюють перетворювання ***N*** силовими каналами (однотипними перетворювачами постійної напруги будь-якого відомого типу), необхідно й вистачає виконання таких умов: наявності зсуву в часі електричних процесів у двох, трьох ..., ***N*** силових каналах та спільних електричних колах (вхідних чи вихідних), у яких здійснюється підсумовування зсунутих у часі електричних процесів.

Тут і далі пристрій ***DC–DC*** *Converters* або систему модульної структури, в якій зреалізовується багатофазний принцип перетворювання електричної енергії, називатимемо багатофазним імпульсним перетворювачем постійної напруги ***БІП***. Аналогічний пристрій, який містить ***N СК***, які працюють синфазно, називатимемо однофазним імпульсним перетворювачем ***ОІП***, оскільки в цьому разі електричні процеси в його спільних вхідних (підімкнених до джерела первинного електроживлення) та вихідних (навантаження) колах є ідентичні до процесів у перетворювачі з одного силового каналу сумарної потужності. Спільні кола *20*: вхідні й вихідні – ***DC–DC*** *Converters 12* модульної структури, вихідні – джерела (джерел) первинного електроживлення *10* і вхідні – кола навантаження (навантажень) *14*, у яких протікають електричні процеси кількох (двох, трьох і більше) перетворювачів електричної енергії (силових каналів, ***DC–DC*** *Converters*), називатимемо засобами підсумовування перетвореної й регульованої електричної енергії (струмів, напруг, потужності).

Отже, багатофазний принцип перетворювання електроенергії в ***ПЕЕ*** – пристроях і системах – може бути реалізовано шляхом поділу одного імпульсного процесу перетворювання електроенергії на ***N*** процесів меншого рівня, зсув їх у часі й наступному підсумовуванні в ***DC–DC*** *Converters*:

- у вхідних та вихідних колах при перетворюванні електричної енергії одного джерела первинного електроживлення (див. рис. 2.46, *а*);
- у вихідних колах при перетворюванні електричної енергії кількох первинних джерел живлення (див. рис. 2.46, *б*);
- у вхідних колах при перетворюванні електричної енергії одного первинного джерела електроживлення на електричну енергію для кількох автономних навантажень (див. рис. 2.46, *в*).

2.7.3 Показники якості фільтрувальних властивостей однофазної та багатофазної структур побудови перетворювачів

І в однофазній і в багатофазній структурі перетворювача в окремо взятому ***СК*** у силовому дроселі характер зміни струму $i_{Lk}(t)$ для кожного з восьми зазначених у табл. 2.2 типів ***СК*** є аналогічний і його може бути подано у вигляді (2.52):

$$i_{Lk}(t) = \begin{cases} i_{нk}(t) & \text{за} \quad 0 \le t \le t_{нk}; \\ i_{пk}(t) & \text{за} \quad t_{нk} \le t \le t_{вk}; \\ 0 & \text{за} \quad t_{пk} < t \le T. \end{cases} \tag{2.52}$$

де $i_{нk}(t) = I_{\min k} + I_{mk}\, t/t_{нk}$, $i_{вk}(t) = I_{\min} + I_{mk}\,(1 - t/t_{вk})$.

Подамо через струми в колах живлення $i_{ожу}(t)$, $i_{бжу}(t)$ і навантаження $i_{ожу}(t)$, $i_{бжу}(t)$ (де залежно від прийнятого позначення типу ***СК*** y = 1, 2, ... 8) відповідно в однофазних (***ОІП***) і багатофазних (***БІП***) перетворювачах (див. рис. 2.46, *а*):

$$i_{ожу}(t) = i_{бжу}(t) = \sum_{k=1}^{N} i_{нk}(t_k) \quad \text{за } y = 1, 3, 4, \ldots, 8; \tag{2.53}$$

$$i_{ону}(t) = i_{бну}(t) = \sum_{k=1}^{N} i_{вk}(t_k) \quad \text{за } y = 2, 3, 5; \tag{2.54}$$

$$i_{оjу}(t) = i_{бjу}(t) = \sum_{k=1}^{N} i_{Lk}(t_k) \quad j = \begin{cases} \text{ж} & \text{за } y = 2; \\ \text{н} & \text{за } y = 1, 4, 6, 7, 8, \end{cases} \tag{2.55}$$

де t_k – поточний час k - того ***СК*** :

для ***ОІП*** $$t_k = t; \tag{2.56}$$

для ***БІП*** $$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} & \text{за } t - t_{ck} > 0; \\ t - t_{ck} + T & \text{за } t - t_{ck} < 0; \\ t - t_{ck} - T & \text{за } t - t_{ck} > T. \end{cases} \tag{2.57}$$

Співвідношення (2.52)...(2.57) дозволяють у часовій області виконувати дослідження електричних процесів в ***ОІП*** та ***БІП***.

Мінімальні й максимальні значення струмів у колах живлення й навантаження ***ОІП*** та ***БІП*** визначимо у вигляді

$$I_{\text{жу}\min\limits_{\max}} = \min\limits_{\max}\left\{\sum_{k=1}^{N} i_{\text{нк}}(t_k)\right\} \qquad \text{за } y = 1,2,3,4,5,6,7,8; \tag{2.58}$$

$$I_{\text{ну}\min\limits_{\max}} = \min\limits_{\max}\left\{\sum_{k=1}^{N} i_{\text{вк}}(t_k)\right\} \qquad \text{за } y = 2,3,5; \tag{2.59}$$

$$I_{\text{ну}\min\limits_{\max}} = \min\limits_{\max}\left\{\sum_{k=1}^{N} i_{Lk}(t_k)\right\} \qquad \text{за } y = 1,4,5,6,7,8. \tag{2.60}$$

Використовуючи (2.58)...(2.60), визначимо розмах пульсацій струму споживання $\Delta I_{\text{жу}}$ і струму навантаження $\Delta I_{\text{ну}}$, а також розмах пульсацій напруги в колі живлення ($\Delta U_{\text{жу}}$) і навантаження ($\Delta U_{\text{ну}}$) ***ОІП*** та ***БІП*** для $y = 1, 2, ..., 8$ у вигляді

$$\Delta I_{\text{жу}} = I_{\text{жу max}} - I_{\text{жу min}}; \qquad \Delta I_{\text{ну}} = I_{\text{ну max}} - I_{\text{ну min}}; \tag{2.61}$$

$$\Delta U_{\text{жу}} = \Delta I_{\text{жу}} R_{\text{ж}} / \sqrt{R_{\text{ж}}^2 \omega^2 C_{\text{ж}}^2 + 1}; \quad \Delta U_{\text{ну}} = \Delta I_{\text{ну}} R_{\text{н}} / \sqrt{R_{\text{н}}^2 \omega^2 C_{\text{н}}^2 + 1}, \tag{2.62}$$

де $\omega = 2\pi/T$ для ***ОІП*** та $\omega = 2\pi N/T$ для ***БІП***; $R_{\text{ж}} = U_{\text{ж}}/I_{\text{ж}}$ – опір кола навантаження джерела первинного живлення; $C_{\text{ж}}$, $C_{\text{н}}$ – ємності вхідного й вихідного конденсаторів перетворювача; $I_{\text{ж}}$ – середнє значення споживаного струму перетворювача від ***ДПЕ***.

Математичні моделі електричних процесів дозволяють визначати коефіцієнти форми струмів (на вході – $K_{\text{жф}}$, на виході – $K_{\text{фн}}$), напруг (на вході – $K_{\text{фж}U}$, на виході – $K_{\text{фн}U}$), коефіцієнти пульсацій струмів (на вході – $K_{\text{пж}}$, на виході – $K_{\text{жн}}$) і напруг (на вході – $K_{\text{пж}U}$ і на виході – $K_{\text{жн}U}$) і використовувати їх як показники якості процесів перетворювання електричної енергії з багатофазним і однофазним принципами роботи.

Для характеристики ефективності зменшення змінних складових, які впливають на пристрій, наприклад на згладжувальний фільтр, на практиці широко використовується показник якості – коефіцієнт згладжування:

$$S = K_{\text{пвх}}/K_{\text{п вих}}, \tag{2.63}$$

де $K_{\text{пвх}}$, $K_{\text{пвих}}$ – коефіцієнти пульсацій вхідної (на вході пристрою) і вихідної (на виході пристрою) напруги (струму).

Для характеристики ефективності зменшення змінних складових у вхідних і вихідних колах перетворювачів модульної структури (і з однофазним і з багатофазними принципами перетворювання) впровадимо показник якості – коефіцієнт згладжування структури перетворювача на вході $S_{\text{ж}}$ й виході $S_{\text{н}}$:

$$\left.\begin{array}{ll} \textbf{за струмом} & S_{\text{ж}} = K_{\text{жср}}/K_{\text{пж}}; \qquad S_{\text{н}} = K_{\text{нср}}/K_{\text{пн}}; \\ \textbf{за напругою} & S_{\text{ж}U} = K_{\text{жUср}}/K_{\text{пж}U}; \qquad S_{\text{н}} = K_{\text{нUср}}/K_{\text{пн}U}, \end{array}\right\} \tag{2.64}$$

$$K_{\text{жср}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} K_{\text{пж}k}; \qquad K_{\text{нср}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} K_{\text{пн}k};$$
$$K_{\text{ж}U\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} K_{\text{пж}Uk}; \quad K_{\text{н}U\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} K_{\text{пн}Uk}; \tag{2.65}$$

де $K_{\text{пж}k}$, $K_{\text{пн}k}$ ($K_{\text{пж}Uk}$, $K_{\text{пн}Uk}$) – коефіцієнти пульсацій струмів (напруг) на вході й виході k-того *СК* відповідно.

За забезпечення симетрії електричних процесів $K_{\text{пж}1} = K_{\text{пж}2} = \ldots = K_{\text{пж}N} = K_{\text{пж}}$, $K_{\text{пн}1} = K_{\text{пн}2} = \ldots = K_{\text{пн}N} = K_{\text{пн}}$. При цьому для однофазної структури перетворювача коефіцієнти пульсацій на вході, наприклад за струмом $K_{\text{пжо}}$, з *СК* знижувального типу (див. табл. 2.2, $y = 1$) визначаємо як

$$K_{\text{пж}} = \Delta I_{\text{ж}}/2I_{\text{ж}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\Delta I_{\text{ж}k}/2NI_{\text{ж}k} = K_{\text{пср}}. \tag{2.66}$$

У результаті на підставі (2.64) та (2.66) для однофазної структури перетворювача здобуваємо коефіцієнт згладжування на вході $S_{\text{жо}} = 1$. Неважко показати, що для однофазної структури перетворювача й $S_{\text{но}}$ також дорівнює 1.

Отже, перетворювач з однофазним принципом перетворювання не має ефекту придушення змінної складової. Для багатофазної структури перетворювача запишемо (за виконання прийнятих припущень):

$$\left.\begin{aligned} S_{\text{жб}} &= (\Delta I_{\text{ж}k}/I_{\text{ж}k})/(\Delta I_{\text{жб}}/I_{\text{ж}k}) = \Delta I_{\text{ж}k}N/\Delta I_{\text{жб}}; \\ S_{\text{нб}} &= (\Delta I_{\text{н}k}/I_{\text{н}k})/(\Delta I_{\text{нб}}/I_{\text{н}k}) = \Delta I_{\text{н}k}N/\Delta I_{\text{нб}}. \end{aligned}\right\} \tag{2.67}$$

З іншого боку, коефіцієнти згладжування $S_{\text{жб}}$ та $S_{\text{нб}}$ можуть бути використані і як показники, які схарактеризовують ефективність згладжування змінної складової багатофазної структури перетворювача порівняно з однофазною, виконаною також з N силових каналів, оскільки:

$$K_{\text{пжо}}/K_{\text{пжб}} = N\Delta I_{\text{ж}k}/\Delta I_{\text{жб}} = S_{\text{жб}}; \; K_{\text{пно}}/K_{\text{пнб}} = N\Delta I_{\text{н}k}/\Delta I_{\text{нб}} = S_{\text{нб}}. \tag{2.68}$$

На практиці при аналізі електричних процесів у перетворювачах (при дослідженнях, проектуванні) зручно й доцільно користуватися єдиною системою координат, наприклад за порівняльного оцінювання фільтрувальних властивостей різних кіл перетворювача.

Коефіцієнти пульсацій струму в активних опорах $R_{\text{ж}}$, $R_{\text{н}}$ перетворювача (відповідно $K_{\text{пж}R}$ та $K_{\text{пн}R}$) визначаються пульсаціями струмів $\Delta I_{\text{ж}}$ та ΔI_R, які протікають через ці опори:

$$\Delta I_{\text{жу}} = \Delta U_{\text{жу}}/R\text{ж} = 2U_{\text{жу}}K_{\text{пж}U} \quad \text{та} \quad \Delta I_R = 2U_{\text{н}}K_{\text{пн}U}/R_{\text{н}}. \tag{2.69}$$

З огляду на те, що $K_{\text{пж}R} = \Delta I_{\text{ж}}/2I_{\text{ж}}$, $K_{\text{пн}R} = \Delta I_R/2I_{\text{н}}$, для (2.51) запишемо:

$$K_{\text{пж}R} = K_{\text{пж}U} \text{ і } K_{\text{пн}R} = K_{\text{пн}U} \tag{2.70}$$

У загальному випадку ефективність придушення змінних складових у вхідних, вихідних колах та в колах навантаження перетворювачів модульної структури і з однофазним і з багатофазним принципами перетворювання електричної енергії й за симетрії, й за асиметрії електричних процесів може бути оцінено показниками якості – коефіцієнтами згладжування модульної структури на вході $\boldsymbol{S_{бж}}$, виході $\boldsymbol{S_{бн}}$ й у колі навантаження $\boldsymbol{S_{бR}}$:

$$\left.\begin{array}{ll} \textbf{за струмом} & \boldsymbol{S_{бж}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пжо}}}{\boldsymbol{K_{пж}}}; \quad \boldsymbol{S_{бн}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пно}}}{\boldsymbol{K_{пн}}}; \quad \boldsymbol{S_{бR}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пRo}}}{\boldsymbol{K_{пR}}}; \\ \textbf{за напругою} & \boldsymbol{S_{бжU}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пжUo}}}{\boldsymbol{K_{пжU}}}; \quad \boldsymbol{S_{бнU}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пнUo}}}{\boldsymbol{K_{пнU}}}; \quad \boldsymbol{S_{бRU}} = \dfrac{\boldsymbol{K_{пRUo}}}{\boldsymbol{K_{пRU}}}, \end{array}\right\} \qquad (2.71)$$

де $\boldsymbol{K_{пжо}}$, $\boldsymbol{K_{пно}}$, $\boldsymbol{K_{пRo}}$, ($\boldsymbol{K_{пжU}}$, $\boldsymbol{K_{пнU}}$, $\boldsymbol{K_{пRU}}$,) – коефіцієнти пульсації струмів (напруг) відповідно на вході, виході й у колі опору навантаження з однофазним принципом перетворювання за симетрії електричних процесів.

3 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ "ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ"

В пунктах 3.1 … 3.4 установіть відповідність у вигляді комбінації цифр та літер, набравши, наприклад, 1в, 2а, ...

3.1 Пристрої і системи електроживлення

Терміни:

1) первинне джерело електроживлення;
2) вторинне джерело електроживлення;
3) система вторинного електроживлення.

Поняття та означення:

а) перетворює параметри електричної енергії (рід струму, рівень напруги постійний та змінний струми і т. ін.);
б) сукупність засобів вторинного електроживлення, що забезпечують необхідними напругами по заданій програмі всі кола апаратури зв'язку;
в) перетворює неелектричну енергію в електричну.

Відповідь:

3.2 Джерела первинного електроживлення постійного струму

Терміни:

1) термоелектричні генератори;
2) сонячні батареї;
3) хімічні джерела;
4) паливні елементи.

Поняття та означення:

а) гальванічні елементи одноразового використання й акумулятори багаторазового використання, в яких енергія окислювально-відновних процесів перетворюється на електричну енергію постійного струму;
б) у яких нагрівання контакту двох напівпровідникових матеріалів різного типу електропровідності призводить до появи е. р. с. на їхніх вільних (холодних) кінцях;
в) у яких вплив фотона світлової (променистої) енергії призводить до виникнення парних зарядів електрон-дірка, до різниці концентрацій носіїв зарядів у напівпровідниках типу ***n*** та ***p*** і виникнення фото – е.р.с.;
г) у яких забезпечується безпосереднє перетворювання енергії хімічних реакцій на електричну енергію шляхом електрохімічного окислювання палива.

Відповідь:

3.3 Терміни та поняття в області енергопостачання

Терміни:

1) енергоносій;
2) первинна енергія;
3) паливно-енергетичні ресурси (***ПЕР***).

Поняття та означення:

а) енергія, укладена в ***ПЕР***;
б) сукупність природних та виробничих енергоносіїв, запасена енергія яких за існуючого рівня розвитку техніки й технології є доступна для використовування в господарській діяльності;
в) речовина в різних агрегатних станах (твердий, рідкий, газоподібний) або інші форми матерії (плазма, поле, випромінювання й т. ін.), запасена енергія яких може бути використана для цілей енергопостачання.

Відповідь:

3.4 Показники ефективності паливно-енергетичних ресурсів

Показники:

1) енергоємність виробництва продукції;
2) показник економічності енергоспоживання виробу;
3) втрати енергії.

Поняття та означення:

а) кількісна характеристика експлуатаційних властивостей виробу, що відбиває його технічну досконалість, зумовлена досконалістю конструкції та якістю виготовляння, рівнем чи ступенем споживання ним енергії та (чи) палива при використовуванні цього виробу за прямим функціональним призначенням;
б) величина споживання енергії та (чи) палива на основні й допоміжні технологічні процеси виготовляння продукції, виконування робіт, надавання послуг на базі заданої технологічної системи;
в) різниця поміж кількістю підведеної (первинної) і споживаної (корисної) енергії.

Відповідь:

В пунктах 3.5 … 3.19 на кожне незавершене твердження одна чи кілька відповідей можуть бути вірними. Виберіть правильний варіант відповіді

А	***Б***	***В***	***Г***	***Д***	***Е***	***Ж***	***З***
вірно тільки 1	***вірно тільки 2***	***вірно тільки 3***	***вірно тільки 1 та 2***	***вірно тільки 2 та 3***	***вірно тільки 1 та 3***	***вірно чи 1 чи 2***	***вірно тільки всі***

3.5 У системах електроживлення змінного струму підприємств зв'язку одержують електричну енергію:

1) від державних енергосистем;
2) від власних дизель-електричних станцій.

Відповідь:

3.6 Природний енергоносій – це:

1) вода гідросфери (за використовування енергії рік, морів, океанів);
2) гаряча вода, пара геотермальних джерел;
3) повітря атмосфери (за використовування енергії вітру);
4) біомаса;
5) органічне паливо (нафта, газ, вугілля тощо).

Відповідь:

3.7 Раціональне використовування паливно-енергетичних ресурсів:

1) вибір оптимальної структури енергоносіїв, тобто оптимального кількісного співвідношення різних використовуваних видів енергоносіїв в установці;
2) комплексне використовування палива, у т.ч. відходів палива;
3) комплексне використовування гідроресурсів рік та водойм.

Відповідь:

3.8 Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат:

1) який перетворює параметри електричної енергії змінного струму;
2) який перетворює параметри електричної енергії постійного струму;
3) який перетворює параметри електричної енергії (напругу, струм, частоту, кількість фаз та форму кривої напруги чи струму).

Відповідь:

3.9 Дослідження ненавантаженого стану трансформатора проводиться для визначання:

1) втрат потужності в магнітопроводі (“втрат у сталі”);
2) втрат потужності в обмотках (“втрат у міді”);
3) коефіцієнта трансформації.

Відповідь:

3.10 Дослідження короткого замикання трансформатора проводиться для визначання параметрів трансформатора:

1) втрат потужності у магнітопроводі (“втрат у сталі”);
2) коефіцієнта трансформування;
3) втрат потужності в обмотках (“втрат у міді”).

Відповідь:

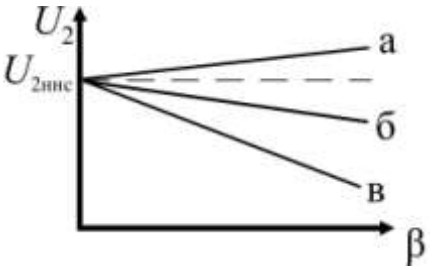
3.11 Зовнішньою характеристикою трансформатора називається залежність:

1) вторинної напруги U_2 від струму навантаження I_2;
2) первинної напруги U_1 від струму навантаження I_2;
3) за збереження сталості первинної напруги (U_1 = const);
4) за збереження сталості вторинної напруги (U_2 = const).

Відповідь:

3.12 Зовнішні характеристики трансформатора наведено на рисунку для різних за характером навантажень:

1) а – за активного; б – за активно-ємнісного; в – за активно-індуктивного;
2) а – за активно-ємнісного; б – за активного; в – за активно-індуктивного;
3) а – за активно-індуктивного; б – за активно-ємнісного; с– за активного;
4) а – за активно-індуктивного; б – за активного; в – за активно-ємнісного.



Відповідь:

3.13 Коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) трансформатора являє собою:

1) відношення активної потужності на виході трансформатора (віддаваної до навантаження) до активної потужності на вході трансформатора (споживаної з мережі);
2) відношення повної потужності на виході трансформатора до повної потужності на вході трансформатора;
3) відношення активної потужності на виході трансформатора до повної потужності на виході трансформатора.

Відповідь:

3.14 Чи існуватиме фазовий зсув поміж струмом і напругою на первинній стороні трансформатора, якщо навантаження трансформатора має активний характер:

1) буде, оскільки і первинна і вторинна обмотки трансформатора мають індуктивності розсіювання, а струм ненавантаженого стану трансформатора має реактивну (індуктивну) складову;
2) не буде, оскільки навантаження трансформатора має активний характер.

Відповідь:

3.15 За трифазної мережі змінного струму перетворювання напруги можна забезпечити:

1) за допомогою трьох однакових однофазних трансформаторів з окремими магнітопроводами;
2) за допомогою одного трифазного трансформатора зі спільним для всіх фаз осердям, у вигляді тристрижньового магнітопроводу;
3) за допомогою одного трансформатора на одному кільцевому магнітопроводі з фазними обмотками у вигляді котушок (первинна і вторинна), розташованих зі зсувом на 120 градусів одна відносно одної по колу осердя.

Відповідь:

3.16 Для нормальної паралельної роботи трансформаторів (наприклад з метою збільшення потужності в колі навантаження) необхідно забезпечити:

1) рівність номінальних первинних та вторинних напруг трансформаторів;
2) належність трансформаторів до однакових груп;
3) рівність напруг коротких замикань, а також активних і реактивних складових напруг коротких замикань трансформаторів.

Відповідь:

3.17 Недоліком автотрансформатора перед трансформатором такої самої корисної потужності є:

1) наявність електричного зв'язку поміж вхідними та вихідними колами, усяке порушення режиму чи аварії на одному боці призводить до порушення режиму на іншому);
2) низька напруга короткого замикання і пов'язані з цим великі струми короткого замикання та механічні зусилля;
3) більша витрата активних матеріалів (міді, сталі).

Відповідь:

3.18 Перевагою автотрансформатора перед трансформатором такої самої корисної потужності є:

1) менша витрата активних матеріалів (міді, сталі);
2) менше втрати енергії;
3) більш високий к.к.д.;
4) менша зміна напруги за змінювання навантаження.

Відповідь:

3.19 Вимірювальні трансформатори застосовуються в колах змінного струму для:

1) розширення діапазону вимірювань вимірювальних приладів;
2) ізоляції вимірювальних приладів від струмоведучих шин, які перебувають під високою напругою;
3) підвищення точності вимірювання.

Відповідь:

В пунктах 3.20 … 3.28 установіть відповідність у вигляді комбінації цифр та літер, набравши, наприклад, 1в, 2а, ...

3.20 Трансформатор характеризується такими видами потужності:

Вид потужності:

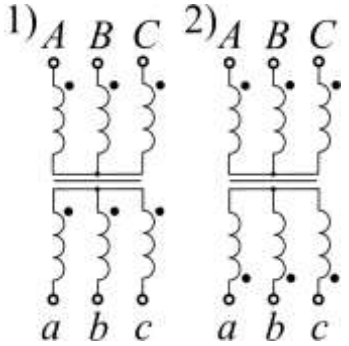
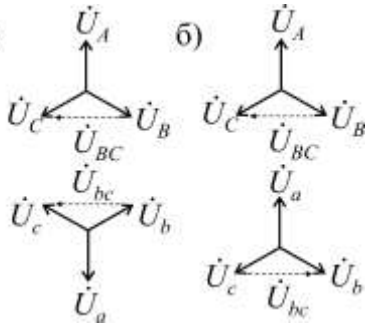
1) електромагнітна потужність;
2) корисна чи віддавана;
3) розрахункова;
4) типова чи габаритна.

Поняття та означення:

а) є добутком (U_2I_2) діючих значень напруги U_2 та струму I_2 вторинної обмотки;
б) передавана з первинної обмотки до вторинної електромагнітним шляхом і визначувана добутком E_2I_2 е. р. с. E_2 та діючого значення струму I_2 вторинної обмотки;
в) схарактеризовує габаритні розміри кожної з обмоток трансформатора і визначається як добуток діючого значення струму I_i (де $i = 1, 2, \ldots$), який протікає обмоткою, на величину напруги U_i на її затискачах: для першої обмотки $S_1 = U_1I_1$, для другої $S_2 = U_2I_2$, для третьої $S_3 = U_3I_3$, …;
г) визначає розміри трансформатора і є півсумою $0{,}5(S_1 + S_2 + S_3 + \ldots)$ розрахункових потужностей всіх обмоток трансформатора першої $S_1 = I_1U_1$, другої $S_2 = I_2U_2$, третьої $S_3 = I_3U_3$, … (де $I_1, U_1; I_2, U_2; I_3, U_3$; … діючого значення струмів і напруг відповідно першої, другої, третьої, … обмоток трансформатора).

Відповідь:

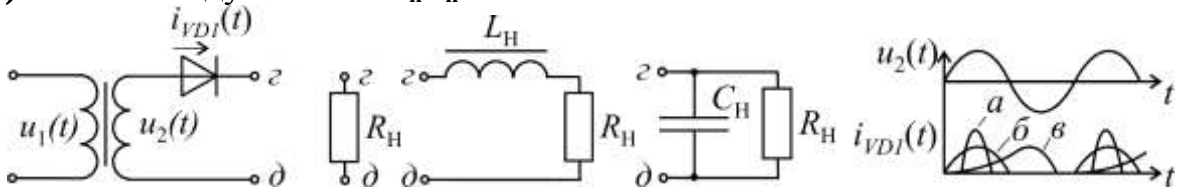
3.21 Приклади позначання груп з'єднування обмоток трансформаторів:

Схема з'єднання	*Векторна діаграма*	*Позначення групи з'єднання*
		в) ⅄/⅄ – 12 г) ⅄/⅄ – 6

Відповідь:

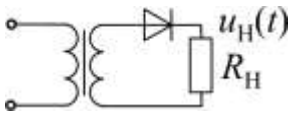
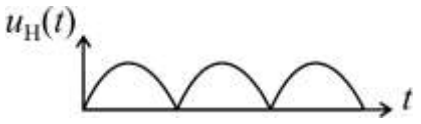
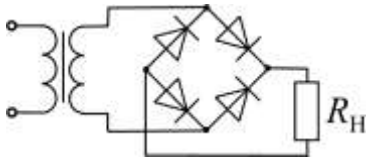
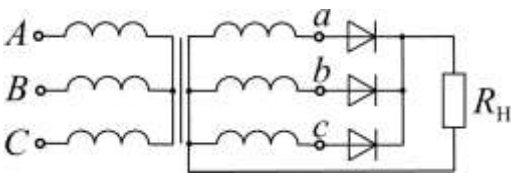
3.22 Діаграми струму $i_{VD1}(t)$ діода однофазної однотактної схеми випрямляння відповідають роботі на такий характер навантаження:

1) активний $R_н$;
2) активно-ємнісний $R_н C_н$;
3) активно-індуктивний $R_н L_н$.



Відповідь:

3.23 Однотактні та двотактні схеми випрямляння за роботи на активне навантаження:

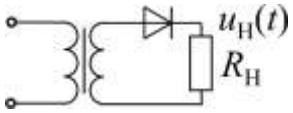
	Схеми випрямляння		*Діаграми напруги $u_н(t)$ у колі навантаження $R_н$*
1)		*а)*	
2)		*б)*	
3)		*в)*	

Відповідь:

3.24 Однотактні та двотактні схеми випрямляння за роботи на активне навантаження:

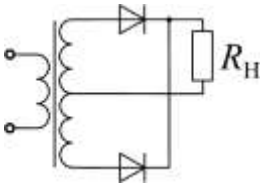
Схеми випрямляння ***Діаграми напруги $u_н(t)$ у колі навантаження $R_н$***

1)



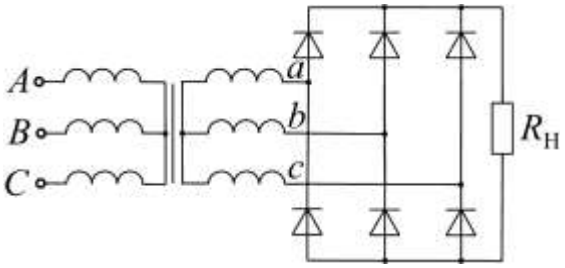
а)

2)

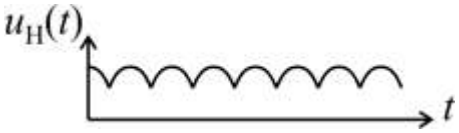


б)

3)



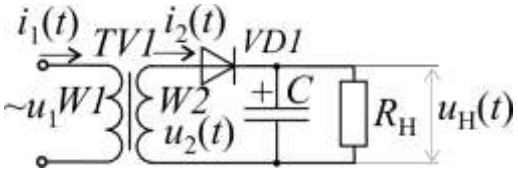
в)

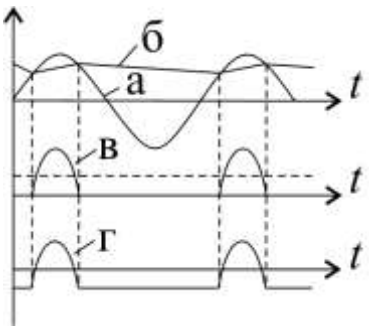


Відповідь:

3.25 Однофазний однотактний випрямляч з ємнісним характером навантаження:

Схема випрямляча ***Діаграми***





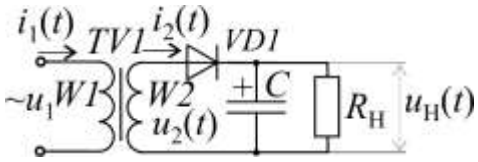
W1, ***W2*** (***W1*** = ***W2***) – кількість обвитків відповідно первинної і вторинної обмоток трансформатора ***TV1***

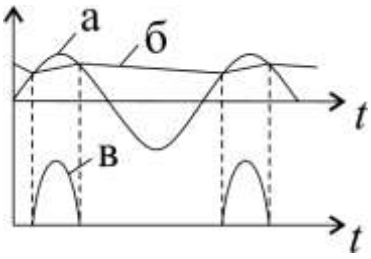
1) $i_1(t)$ – струм первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
2) $i_2(t)$ – струм вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
3) $u_2(t)$ – напруга вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
4) $u_н(t)$ – напруга на навантаженні $R_н$.

Відповідь:

3.26 Однофазний однотактний випрямляч з ємнісним характером навантаження:

Схема випрямляча ***Діаграми***





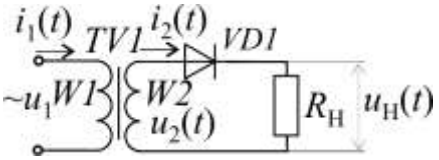
W1, ***W2*** (***W1*** = ***W2***) – кількість обвитків відповідно первинної і вторинної обмоток трансформатора ***TV1***

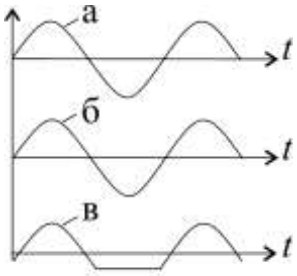
1) $i_1(t)$ – струм первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
2) $i_2(t)$ – струм вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
3) $u_2(t)$ – напруга вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
4) $u_н(t)$ – напруга на навантаженні $R_н$.

Відповідь:

3.27 Однофазний одноперіодний випрямляч з активним характером навантаження:

Схема випрямляча ***Діаграми***





W1, ***W2*** (***W1*** = ***W2***) – кількість обвитків відповідно первинної і вторинної обмоток трансформатора ***TV1***

1) $i_1(t)$ – струм первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
2) $i_2(t)$ – струм вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
3) $u_2(t)$ – напруга вторинної обмотки трансформатора.

Відповідь:

3.28 Випрямлену напругу можна подати у вигляді суми двох складових:

1) U_B – постійної; *а)* $\sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(nm\omega t + \varphi_n)$;

2) u_n – змінної. *б)* $\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} U_{2m}\sin\omega t d\omega t$.

Де ***n*** – номер вищої гармоніки; ***m*** – кількість пульсацій у випрямленій напрузі за один період змінної напруги мережі живлення; U_{mn}– амплітуда ***n***-тої гармоніки; φ_n – початкова фаза ***n***-ої гармоніки

Відповідь:

В пунктах 3.29 … 3.34 доповніть твердження, записавши пропущене слово:

3.29 Індуктивна котушка, призначена для використовування в силовому електричному колі – це _____ .

3.30 Статичний перетворювач змінного струму на постійний – це _____.

3.31 Для зменшення пульсацій випрямленої напруги на виході випрямляча зазвичай встановлюють _____.

3.32 Відношення коефіцієнта пульсації напруги (струму) на вході фільтра до коефіцієнта пульсації напруги (струму) на його виході називають _____ фільтра за напругою (струмом).

3.33 Відношення постійної складової напруги (струму) на виході фільтра до постійної складової напруги (струму) на вході фільтра називають _____ постійної складової напруги (струму).

3.34 Перетворювання електричної енергії постійної напруги (струму) на електричну енергію змінної напруги (струму) здійснюється пристроєм – _____ шляхом періодичної комутації (замикання й розмикання) кола постійного струму.

В пунктах 3.35 … 3.39 на кожне незавершене твердження одна чи кілька відповідей можуть бути вірними. Оберіть правильний варіант відповіді:

А	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*З*
вірно тільки 1	*вірно тільки 2*	*вірно тільки 3*	*вірно тільки 1 та 2*	*вірно тільки 2 та 3*	*вірно тільки 1 та 3*	*вірно і 1, і 2, і 3*	*вірно тільки всі*

3.35 На практиці пульсація чи зміст змінної складової, наприклад у випрямленій напрузі, оцінюється за значенням коефіцієнта пульсації $k_{\text{п}}$:

1) $U_{1m} / U_{\text{В}}$; 2) $(U_{\text{Bmax}} - U_{\text{Bmin}}) / 2U_{\text{В}}$; 3) $\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_{\text{П}}^2} / U_{\text{В}}$.

де U_{1m} – амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги; $U_{\text{В max}}$, $U_{\text{В min}}$ – максимальне і мінімальне миттєві значення випрямленої напруги; $U_{\text{В}}$ – постійна складова (середнє значення) випрямленої напруги.

Відповідь:

3.36 Середнє значення випрямленої напруги може бути подано геометрично:

1) висотою прямокутника з основою, рівною періодові випрямленої напруги;
2) амплітудою кривої випрямленої напруги;
3) площею, що дорівнює площі, обмежуваної кривою випрямленої напруги на цьому періоді.

Відповідь:

3.37 Коефіцієнт потужності перетворювача електричної енергії, наприклад випрямляча, – це:

1) відношення активної потужності в колі навантаження випрямляча до повної потужності, споживаної випрямлячем;
2) відношення активної потужності, споживаної випрямлячем, до повної потужності, споживаної випрямлячем;
3) відношення повної потужності в колі навантаження випрямляча до повної потужності, споживаної випрямлячем.

Відповідь:

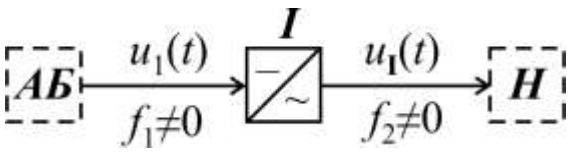
3.38 Ступінь несінусоїдності споживаного струму схарактеризовується коефіцієнтом спотворювання, означуваним як:

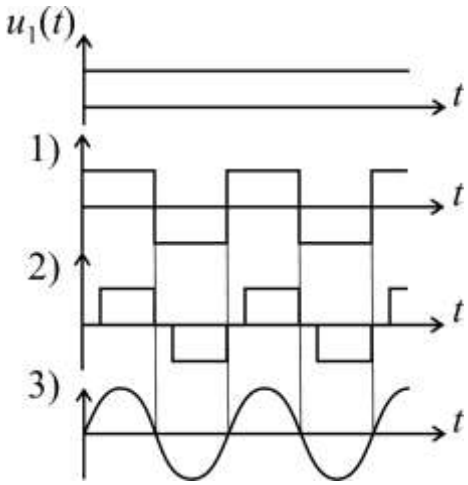
1) відношення максимального значення струму до діючого значення першої (основної) гармоніки струму;
2) відношення діючого значення всього струму до діючого значення першої (основної) гармоніки струму;
3) відношення діючого значення першої (основної) гармоніки струму до діючого значення всього струму.

Відповідь:

3.39 Можлива форма вихідної напруги $u_i(t)$ перетворювача постійної напруги на змінну:

Структурна схема ***Діаграми***





I – інвертор; ***АБ*** – акумуляторна батарея; f_1, f_2 – частоти напруг відповідно на вході та виході ***I***; $u_1(t)$ – напруга на вході ***I***; $u_i(t)$ – напруга на виході ***I***

1) $u_i(t)$ прямокутної форми;
2) $u_i(t)$ прямокутної форми з паузою на нулі;
3) $u_i(t)$ синусоїдної форми.

Відповідь:

В пунктах 3.40 … 3.49 установіть відповідність у вигляді комбінації цифр та літер, набравши, наприклад, 1в, 2а, ...

3.40 Струм, періодично змінюваний в часі, схарактеризовується:

1) коефіцієнтом форми;
2) коефіцієнтом середнього (максимального) значення;
3) коефіцієнтом амплітуди.

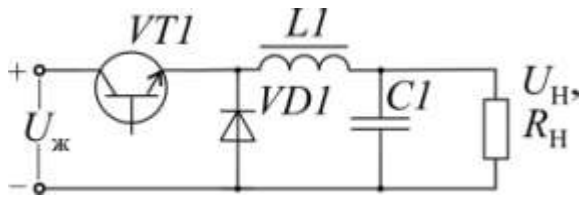
а) відношенням амплітудного (максимального) значення струму до діючого значення;
б) відношенням середнього значення струму до максимального;
в) відношенням діючого значення струму до середнього.

Відповідь:

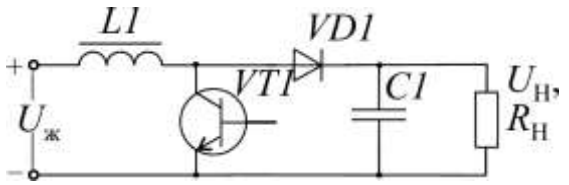
3.41 Силові канали імпульсних перетворювачів постійної напруги без гальванічної розв'язки вхідних і вихідних кіл

<u>Схема перетворювача:</u> ***<u>Тип перетворювача:</u>***

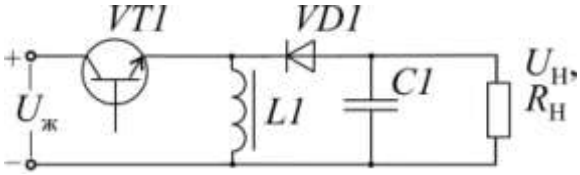
1)



а) підвищувальний;

2) 

б) інвертувальний;

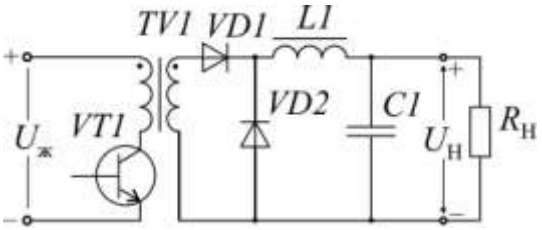
3) 

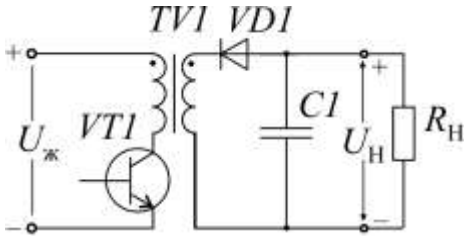
в) понижувальний.

Відповідь:

3.42 Однотактні силові канали імпульсних перетворювачів постійної напруги з гальванічною розв'язкою вхідних та вихідних кіл

Схема перетворювача:

1) 

2) 

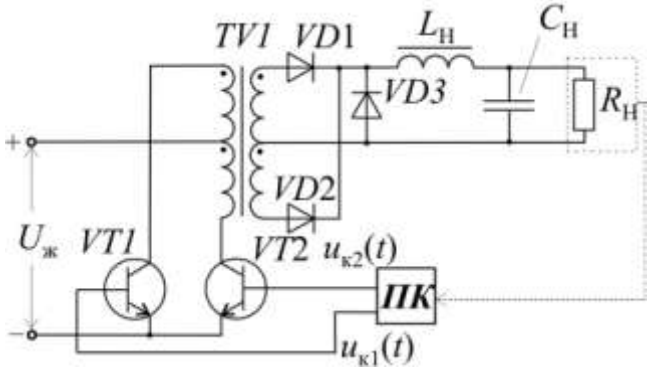
Тип перетворювача:

а) з прямим вмиканням випрямного діода;
б) зі зворотним вмиканням випрямного діода.

Відповідь:

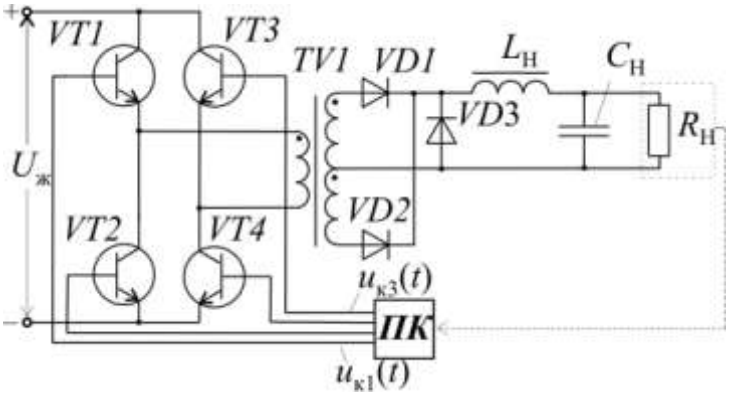
3.43 Варіанти побудови двотактних силових каналів імпульсних перетворювачів постійної напруги

Схема перетворювача: ***Тип перетворювача:***

1) 

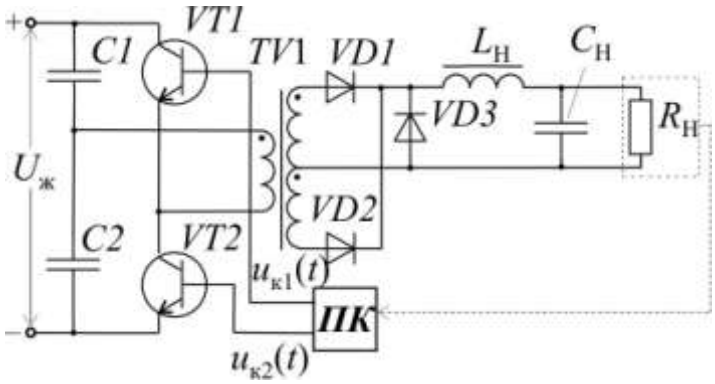
а) мостовий;

2)



б) півмостовий;

3)



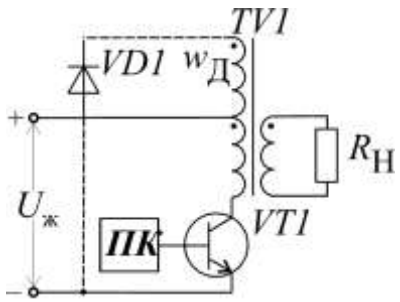
в) з виводом середньої точки трансформатора;

Відповідь:

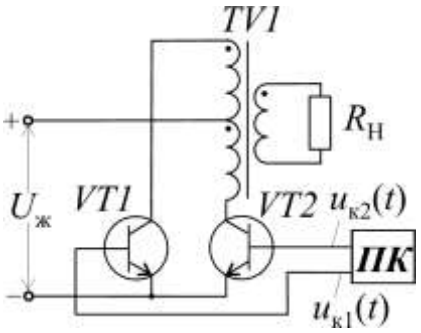
3.44 Варіанти побудови інверторів

Схема інвертора:

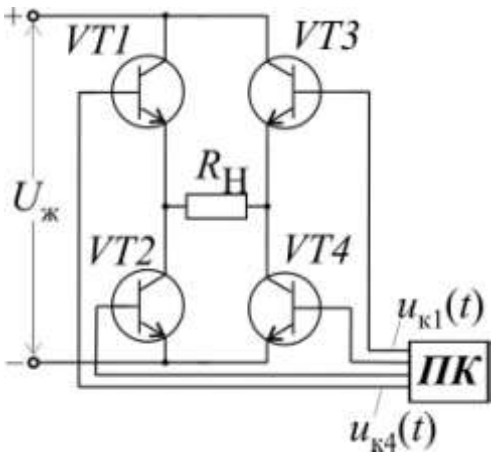
1)



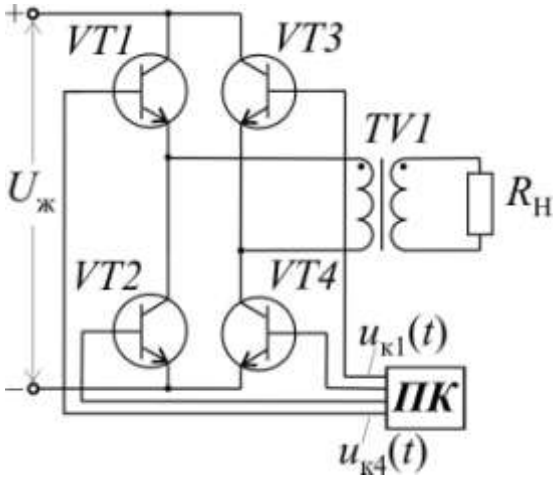
2)



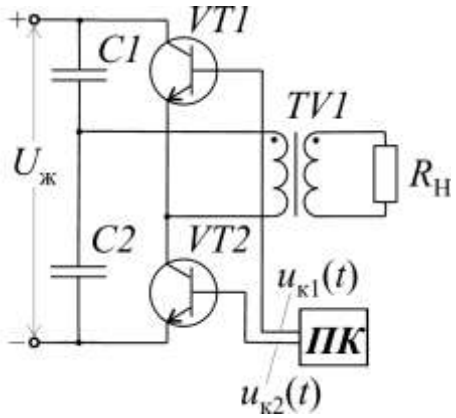
3)



4)



5)



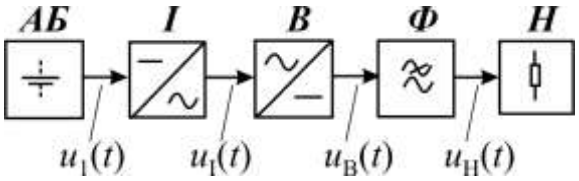
Тип інвертора:

а) двотактний півмостовий;
б) двотактний мостовий;
в) однотактний;
г) двотактний з виводом середньої точки трансформатора;
д) мостовий без гальванічної розв'язки.

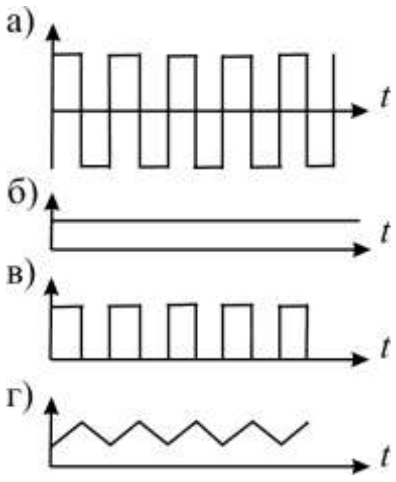
Відповідь:

3.45 Застосовування інвертора при перетворюванні електричної енергії джерела постійного струму з напругою $u_1(t)$ на електричну енергію постійного струму з напругою $u_н(t)$

Функціональна схема



Діаграми



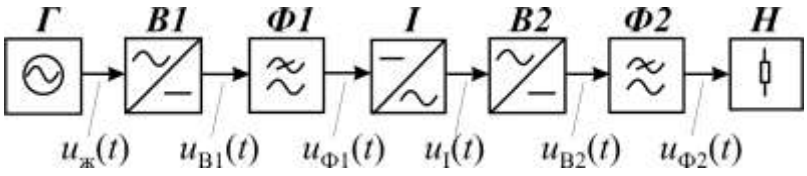
АБ – акумуляторна батарея; ***І*** – інвертор; ***В*** – випрямляч; ***Ф*** – фільтр; ***Н*** – навантаження (наприклад пристрій апаратури зв'язку).

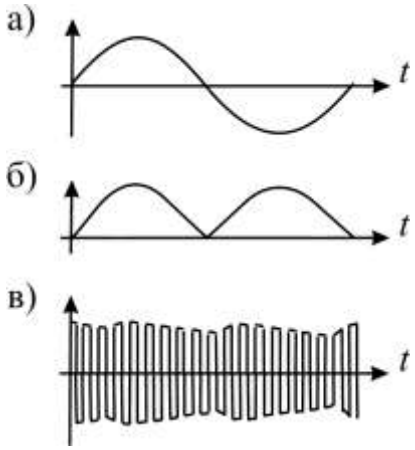
1) $u_1(t)$ – напруга на виході ***АБ***;
2) $u_i(t)$ – напруга на виході інвертора ***І***;
3) $u_в(t)$ – напруга на виході випрямляча ***В***;
4) $u_н(t)$ – напруга на виході фільтра ***Ф***.

Відповідь:

3.46 Застосовування інвертора при перетворюванні електричної енергії джерела змінного струму на електричну енергію постійного струму

Функціональна схема ***Діаграми***





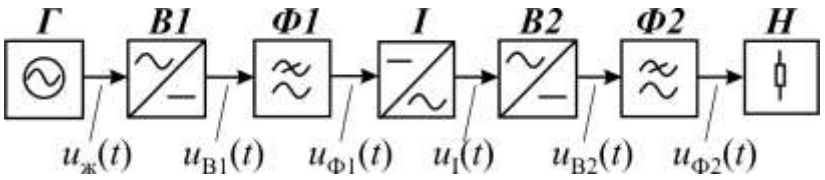
Г – джерело змінного струму;
В1 – мережний випрямляч; ***Ф1*** – мережний фільтр; ***І*** – інвертор; ***В2*** – вихідний випрямляч; ***Ф2*** – вихідний фільтр; ***Н*** –навантаження (пристрої апаратури зв'язку)

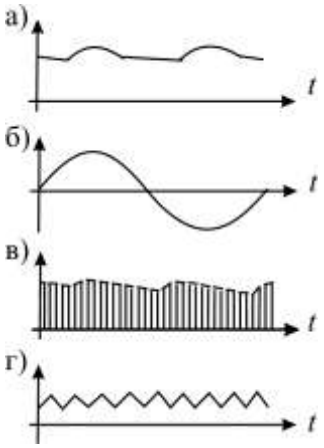
1) $u_1(t)$ – напруга на виході джерела змінного струму ***Г***;
2) $u_{В1}(t)$ – напруга на виході мережного випрямляча ***В1***;
3) $u_і(t)$ – напруга на виході інвертора ***І***.

Відповідь:

3.47 Застосовування інвертора при перетворюванні електричної енергії джерела змінного струму на електричну енергію постійного струму

Функціональна схема ***Діаграми***





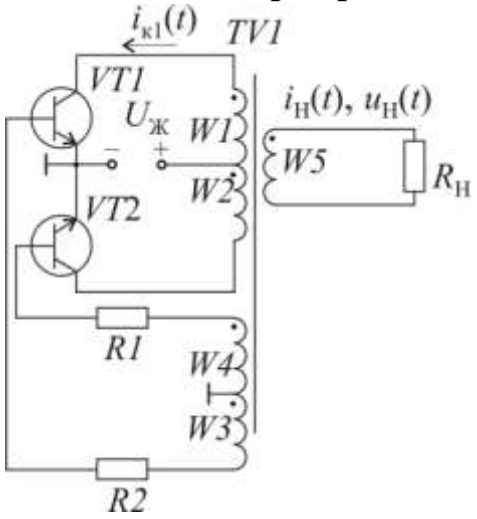
Г – джерело змінного струму; ***В1*** – мережний випрямляч; ***Ф1*** – мережний фільтр; ***І*** – інвертор; ***В2*** – вихідний випрямляч; ***Ф2*** – вихідний фільтр; ***Н*** – навантаження (пристрої апаратури зв'язку)

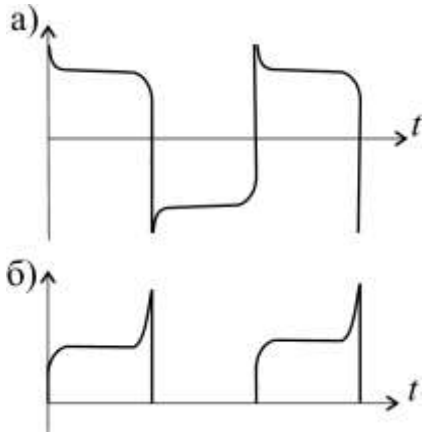
1) $u_1(t)$ – напруга на виході джерела змінного струму ***Г***;
2) $u_{ф1}(t)$ – напруга на виході мережного фільтра ***Ф1***;
3) $u_{в2}(t)$ – напруга на виході вихідного випрямляча ***В2***;
4) $u_н(t)$ – напруга на виході вихідного фільтра ***Ф2***.

Відповідь:

3.48 Однофазний транзисторний інвертор із самозбудженням

Схема інвертора ***Діаграми***



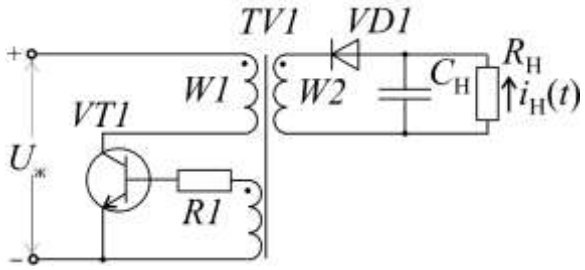


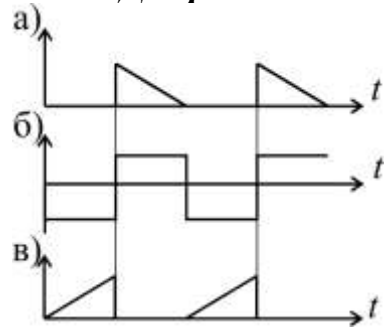
1) $i_{к1}(t)$ – струм первинної півобмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***;
2) $u_2(t)$ – напруга в колі навантаження $R_н$.

Відповідь:

3.49 Однотактний перетворювач постійної напруги із самозбудженням

Схема перетворювача ***Діаграми***





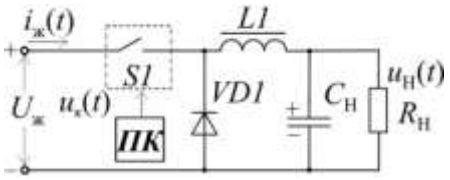
1) $i_1(t)$ – струм первинної обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***;
2) $i_2(t)$ – струм вторинної обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1*** (***W2*** = ***W1***) ;
3) $u_2(t)$ – напруга на вторинній обмотці ***W2*** трансформатора ***TV1*** (***W2*** = ***W1***).

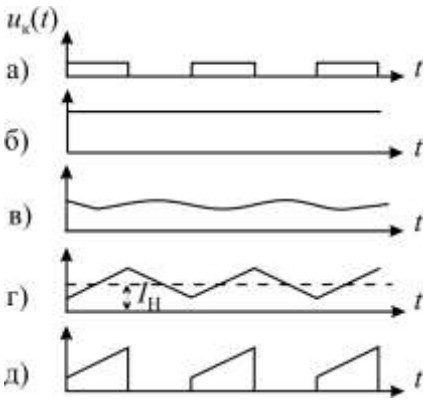
Відповідь:

В пунктах 3.50 … 3.55 установіть відповідність, дописавши пропущене слово (наприклад, підвищувального), і набравши комбінацію цифр та літер (наприклад 1б, 2д, …)

3.50 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі _____ типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





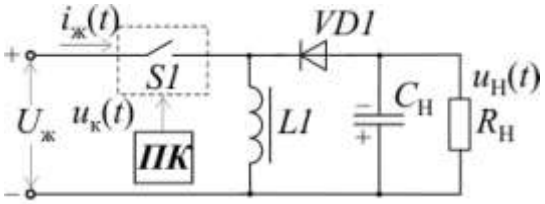
S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***;
$\boldsymbol{I_н}$ – середній струм навантаження $\boldsymbol{R_н}$

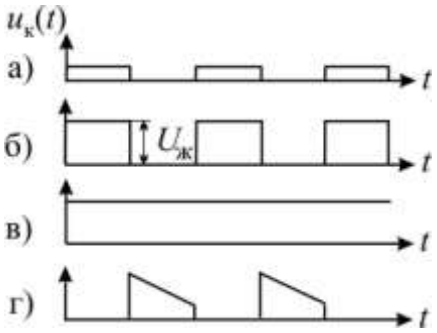
1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_ж(t)}$ – струм, споживаний перетворювачем;
3) $\boldsymbol{i_l(t)}$ – струм силового дроселя ***L1***;
4) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга в колі навантаження.

Відповідь:

3.51 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі _____ типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





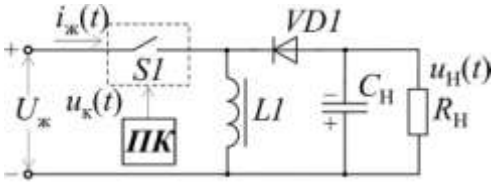
S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***

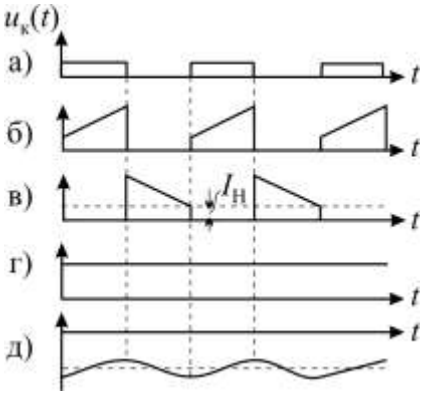
1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_д(t)}$ – струм силового діода ***VD1***;
3) $\boldsymbol{u_ф(t)}$ – напруга на вході фільтра ***L1 C1*** (на силовому диоді ***VD1***);
4) $\boldsymbol{i_L(t)}$ – струм силового дроселя ***L1***;
5) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга в колі навантаження.

Відповідь:

3.52 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі_____типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





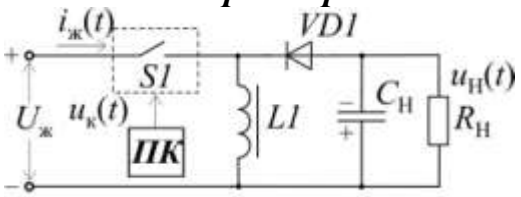
S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***;
$\boldsymbol{I_н}$ – середнє значення струму в колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$

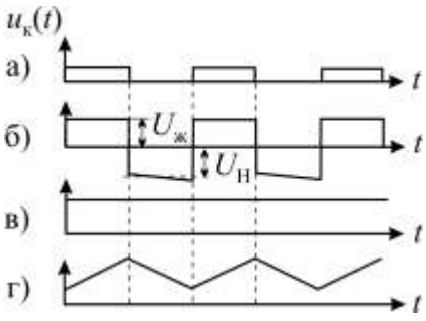
1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_ж(t)}$ – струм, споживаний перетворювачем;
3) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга в колі навантаження;
4) $\boldsymbol{i_д(t)}$ – струм силового діода ***VD1***.

Відповідь:

3.53 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі _____ типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





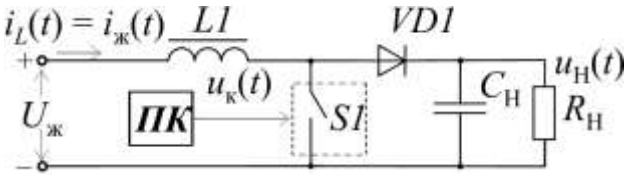
S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{U_ж}$, $\boldsymbol{U_н}$ – середнє значення напруг відповідно на вході й виході перетворювача;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***

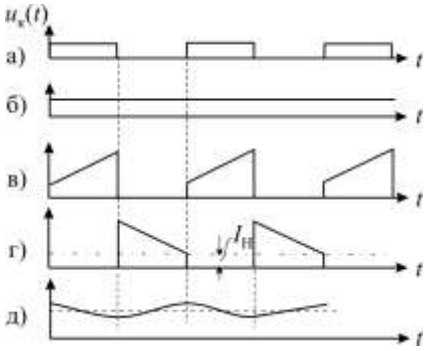
1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_L(t)}$ – струм силового дроселя ***L1***;
3) $\boldsymbol{u_L(t)}$ – напруга на дроселі ***L1***.

Відповідь:

3.54 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі _____ типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





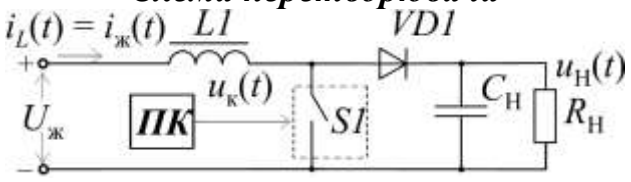
S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***;
$\boldsymbol{I_н}$ – середнє значення струму в колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$

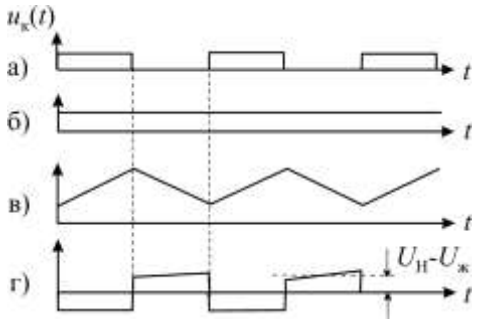
1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_ж(t)}$ – струм, споживаний перетворювачем;
3) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга в колі навантаження;
4) $\boldsymbol{i_д(t)}$ – струм силового діода ***VD1***.

Відповідь:

3.55 Електричні процеси в однотактному імпульсному перетворювачі_____типу.

Схема перетворювача ***Діаграми***





S1 – силовий ключ (наприклад транзистор польовий, біполярний, …);
ПК – пристрій керування;
$\boldsymbol{U_ж}$, $\boldsymbol{U_н}$ – середнє значення напруг відповідно на вході і виході перетворювача;
$\boldsymbol{u_к(t)}$ – напруга сигналу керування на вході ***S1***

1) $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході перетворювача;
2) $\boldsymbol{i_L(t)}$ – струм силового дроселя ***L1***;
3) $\boldsymbol{u_L(t)}$ – напруга на дроселі ***L1***.

Відповідь:

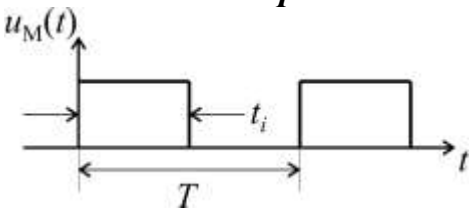
В пунктах 3.56 … 3.60 установіть відповідність у вигляді комбінації цифр та літер, набравши, наприклад, 1в, 2а, ...

3.56 За способом регулювання імпульсні стабілізатори поділяють на стабілізатори:

1) з широтно-імпульсною модуляцією;
2) з частотно-імпульсною модуляцією;
3) з широтно-частотною модуляцією.

а) коли інтервал часу t_i замкненого стану силового ключа не змінюється (t_i = **const**), а частота комутації $f = 1/T$ (де T – період комутації) є змінна;
б) коли інтервал часу t_i замкненого стану силового ключа змінюється (t_i – **var**), а частота комутації f є постійна (f = **const**);
в) коли й інтервал часу t_i, і частота комутації змінні (t_i – **var**, f – **var**).

Часова діаграма



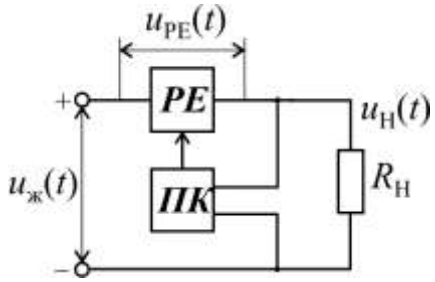
$u_м(t)$ – напруга сигналу керування на виході модулятора

Відповідь:

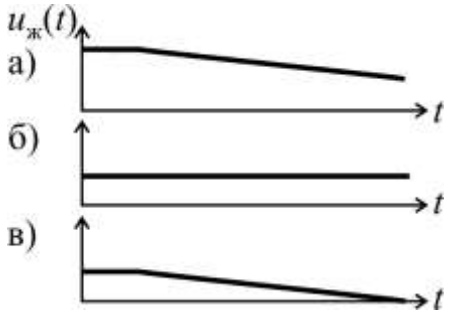
3.57 Стабілізатор постійної напруги з неперервним принципом регулювання

Функціональна схема

з послідовним включенням регулюючого елемента ***РЕ*** і навантаження $R_н$



Діаграми



ПК – пристрій керування; $u_ж(t)$ – напруга на вході стабілізатора (вихідна напруга джерела первинного живлення, наприклад акумуляторної батареї)

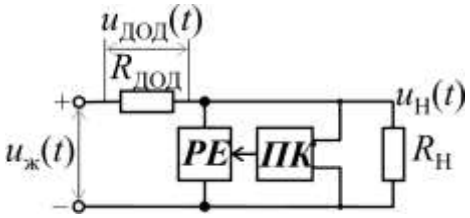
1) $u_{РЕ}(t)$ – спадання напруги на регулювальному елементі ***РЕ***;
2) $u_н(t)$ – напруга на виході стабілізатора (у колі навантаження $R_н$).

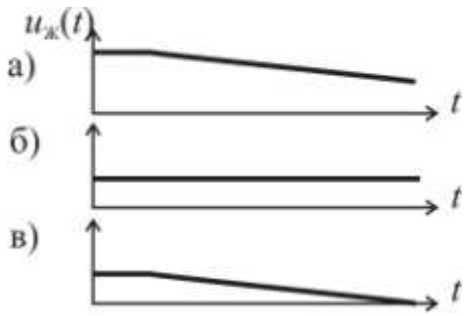
Відповідь:

3.58 Стабілізатор постійної напруги з неперервним принципом регулювання

Функціональна схема ***Діаграми***

з паралельним вмиканням регулювального елемента ***РЕ*** та навантаження $\boldsymbol{R_н}$





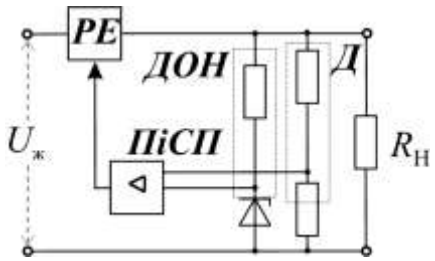
ПК – пристрій керування; $\boldsymbol{u_ж(t)}$ – напруга на вході стабілізатора (вихідна напруга джерела первинного живлення, наприклад акумуляторної батареї)

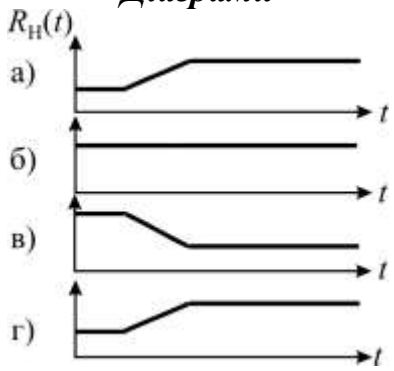
1) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$) ;
2) $\boldsymbol{u_{дод}(t)}$ – напруга на додатковому (баластному) резисторі $\boldsymbol{R_{дод}}$.

Відповідь:

3.59 Стабілізатор напруги з неперервним принципом регулювання

Схема стабілізатора ***Діаграми***





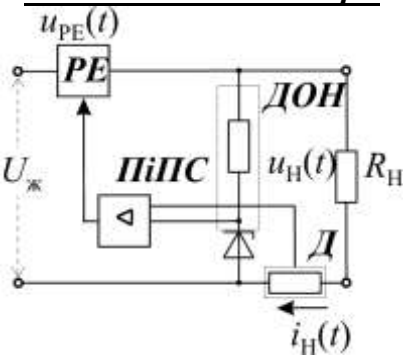
РЕ – регулювальний елемент; ***ПіСП*** – схема порівнювання і підсилювач сигналу неузгодженості; ***Д*** – давач кола зворотного зв'язку (подільник вихідної напруги); ***ДОН*** – джерело опорної напруги; $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж = const}$ – напруга на вході стабілізатора (вихідна напруга джерела первинного живлення, наприклад, акумуляторної батареї); $\boldsymbol{R_н(t)}$ – залежність опору в колі навантаження (змінюється відповідно до діаграми ***а***)

1) $\boldsymbol{r_{РЕ}(t)}$ – опір регулювального елемента ***РЕ***;
2) $\boldsymbol{i_н(t)}$ – струм в колі навантаження $R_н$ (на виході стабілізатора) ;
3) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$).

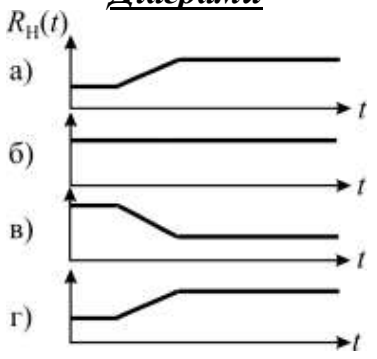
Відповідь:

3.60 Стабілізатор напруги з неперервним принципом регулювання

Схема стабілізатора



Діаграми



РЕ – регулювальний елемент; ***ПіСП*** – схема порівнювання та підсилювач сигналу неузгодженості; ***Д*** – давач кола зворотного зв'язку (давач струму); ***ДОН*** – джерело опорної напруги; $\boldsymbol{u_ж(t) = U_ж}$ – напруга на вході стабілізатора (вихідна напруга джерела первинного живлення, наприклад акумуляторної батареї); $\boldsymbol{R_н(t)}$ – залежність опору в колі навантаження (змінюється відповідно до діаграми ***а***)

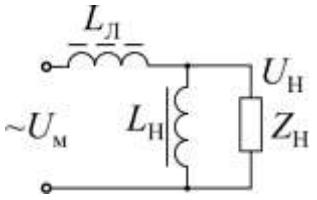
1) $\boldsymbol{u_{РЕ}(t)}$ – спадання напруги на регулювальному елементі ***РЕ***;
2) $\boldsymbol{u_н(t)}$ – напруга на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$);
3) $\boldsymbol{i_н(t)}$ – струм у колі навантаження $R_н$.

Відповідь:

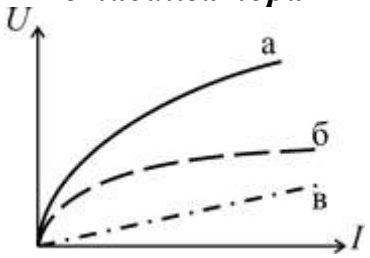
В пунктах 3.61 … 3.63 запишіть номер правильної, на Ваш погляд, відповіді

3.61 Найпростіший параметричній стабілізатор змінної напруги

Схема стабілізатора



Вольт-амперна характеристика стабілізатора



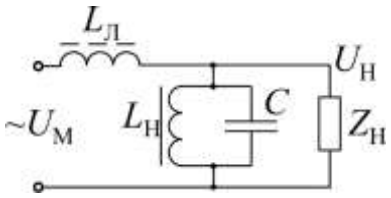
$\boldsymbol{L_л}$ – індуктивний опір дроселя з магнітопроводом, що не насичується;
$\boldsymbol{L_н}$ – індуктивний опір дроселя з магнітопроводом, що насичується;

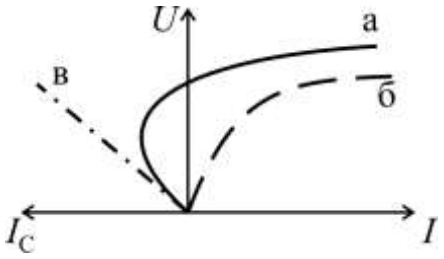
1) а – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_л}$ з магнітопроводом, що не насичується; б – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що насичується; в – напруга $\boldsymbol{U_м}$ на вході стабілізатора;
2) а – напруга $\boldsymbol{U_м}$ на вході стабілізатора; б – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що насичується; в – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_л}$ з магнітопроводом, що не насичується;
3) а – напруга $\boldsymbol{U_м}$ на вході стабілізатора; б – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_л}$ з магнітопроводом що не насичується; в – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що не насичується.

Відповідь:

3.62 Феррорезонансний стабілізатор напруги

Схема стабілізатора ***Вольт-амперні характеристики***





$\boldsymbol{L_л}$ – індуктивний опір дроселя з магнітопроводом, що не насичується; $\boldsymbol{L_н}$ – індуктивний опір дроселя з магнітопроводом, що насичується.

1) а – залежність напруги $\boldsymbol{U_C}$ на конденсаторі $\boldsymbol{C}$ від величини струму що протікає через нього; б – залежність напруги $\boldsymbol{U_{LC}}$ на контурі $\boldsymbol{L_нC}$ від струму контура; в – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що насичується;

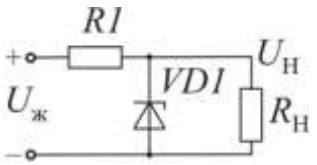
2) а – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що насичується; б – залежність напруги $\boldsymbol{U_C}$ на конденсаторі $\boldsymbol{C}$ від величини струму що протікає через нього; величини струму що протікає через нього; в – залежність напруги $\boldsymbol{U_{LC}}$ на контурі $\boldsymbol{L_нC}$ від струму контура;

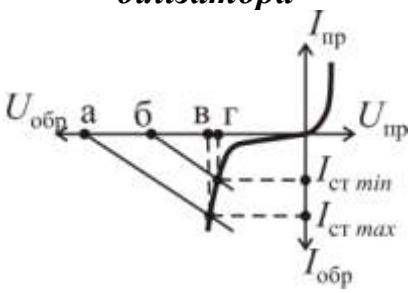
3) а – залежність напруги $\boldsymbol{U_{LC}}$ на контурі $\boldsymbol{L_нC}$ від струму контуру; б – вольт-амперна характеристика дроселя $\boldsymbol{L_н}$ з магнітопроводом, що насичується; в – залежність напруги $\boldsymbol{U_C}$ на конденсаторі $\boldsymbol{C}$ від величини струму $\boldsymbol{I_C}$ що протікає через нього.

Відповідь:

3.63 Параметричний стабілізатор постійної напруги

Схема стабілізатора ***Графічна ілюстрація роботи стабілізатора***





1) а – максимальна напруга $\boldsymbol{U_{ж\ max}}$ на вході стабілізатора; б – мінімальна напруга $\boldsymbol{U_{ж\ min}}$ на вході стабілізатора; в – максимальна напруга $\boldsymbol{U_{н\ max}}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$); г – мінімальна напруга $U_{н\ min}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$);

2) а – максимальна напруга $\boldsymbol{U_{н\ max}}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$); б – мінімальна напруга $\boldsymbol{U_{н\ min}}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $\boldsymbol{R_н}$); в – максимальна напруга $\boldsymbol{U_{ж\ max}}$ на вході стабілізатора; г – мінімальна напруга $\boldsymbol{U_{ж\ min}}$ на вході стабілізатора;

3) а – максимальна напруга $U_{ж\ max}$ на вході стабілізатора; б – максимальна напруга $U_{н\ \ max}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $R_н$); в – мінімальна напруга $U_{ж\ min}$ на вході стабілізатора; г – мінімальна напруга $U_{н\ min}$ на виході стабілізатора (у колі навантаження $R_н$).

Відповідь:

В пунктах 3.64 … 3.76 доповніть твердження, записавши пропущене слово

3.64 Пристрої, що автоматично підтримують у заданих межах напругу чи струм на боці споживача електричної енергії за впливів дестабілізуючих чинників (змінювання напруги мережі живлення, струму навантаження, умов навколишнього середовища – температури, тиску, часу тощо), називаються _____.

3.65 Метод стабілізації, який грунтується на тому, що керування виконавчим (регулювальним) елементом здійснюється за рахунок зовнішнього впливу, що порушує сталість вихідної величини стабілізатора, називається _____.

3.66 Метод стабілізації, який грунтується на тому, що на виконавчий (регулювальний) елемент впливає відхилення вихідної величини від заданого значення, незалежно від того, які зовнішні впливи збурюють сталість режиму, називається _____.

3.67 Коефіцієнт пропорційності, що показує, у скільки разів відносна зміна вихідного стабілізуючого параметра (напруги, струму, …) є менша за відносне змінювання дестабілізуючого чинника (вхідної напруги, струму, навантаження, температури зовнішнього середовища, …), називається _____.

3.68 При роботі в ключовому режимі силовий комутуючий елемент перебуває у двох стійких станах_____.

3.69 Сукупність електростанцій, підстанцій та приймачів електричної енергії, сполучених поміж собою лініями електричної мережі, називається _____.

3.70 Частина електричної системи (сукупність електроустановок для передавання й розподілу електричної енергії), складена з підстанцій, розподільних пристроїв, струмопроводів, повітряних та кабельних ліній різних напруг, називається_____.

3.71 Комплекс споруджень, що забезпечує електропостачання підприємств зв'язку, електроживлення апаратури, освітлення і робо-

ту інших різних навантажень з життєдіяльністю підприємств зв'язку як у нормальних, так і в аварійних умовах, називається _____.

3.72 Комплекс взаємозалежного обладнання і споруджень, призначених для виробництва чи перетворювання, передавання, накопичення, розподілу чи споживання енергії, називається _____.

3.73 Сукупність технічних засобів, що забезпечуюсь якісні й кількісні показники електроенергії, необхідної для живлення апаратури і нормального функціонування підприємства (об'єкта) зв'язку, являє собою_____.

3.74 Частина електроустановки, призначена для перетворювання, регулювання, розподілу, комутації й резервування електроживлення і забезпечення безперебійності подавання необхідних рівнів напруги змінного і постійного струму, називається _____ об'єкта чи підприємства зв'язку.

3.75 Дизельні електростанції (ДЕС) використовуються на підприємствах зв'язку в якості_____.

3.76 Для забезпечення безперебійного електроживлення елекроприймачів змінного струму на підприємствах зв'язку використовується _____.

В пунктах 3.77 … 3.79 на кожне незавершене твердження одна чи кілька відповідей можуть бути вірними. Оберіть правильний варіант відповіді

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
вірно тільки 1	вірно тільки 2	вірно тільки 3	вірно тільки 1 та 2	вірно тільки 2 та 3	вірно тільки 1 та 3	вірно тільки всі

3.77 До складу електроустановки підприємства зв'язку входять:

1) лінії електропередач та трансформаторні підстанції;
2) власні електростанції, електричні мережі технічних територій та приміщень;
3) установки електроживлення, засоби електроосвітлення, пристрої вентиляції та кондиціонування повітря.

Відповідь:

3.78 До складу установки електроживлення підприємства зв'язку входять:

1) випрямні пристрої, акумуляторні батареї;
2) агрегати безперебійного живлення постійним та змінним струмом;
3) перетворювачі та стабілізатори напруги, комутаційне обладнання і струморозподільні мережі, що зв'язують поміж собою обладнання електроживлення й апаратуру зв'язку.

Відповідь:

3.79 Коефіцієнт потужності установки електроживлення (*ЕЖУ*) це:

1) відношення активної потужності до повної, споживаної ***ЕЖУ***;
2) відношення активної потужності в колі навантаження ***ЕЖУ***, до повної потужності, споживаної ***ЕЖУ***;
3) відношення повної потужності в колі навантаження ***ЕЖУ*** до повної потужності, споживаної ***ЕЖУ***.

Відповідь:

В пунктах 3.80 … 3.81 доповніть твердження, записавши пропущені цифри, наприклад, 20 ... 40 …

3.80 Обладнання підприємства зв'язку, як правило, забезпечується електроенергією змінного струму залежно від рівня споживаної потужності чи від трифазної чотирипровідної мережі напругою_____В із заземленою нейтраллю чи від однофазної мережі напругою_____В.

Відповідь:

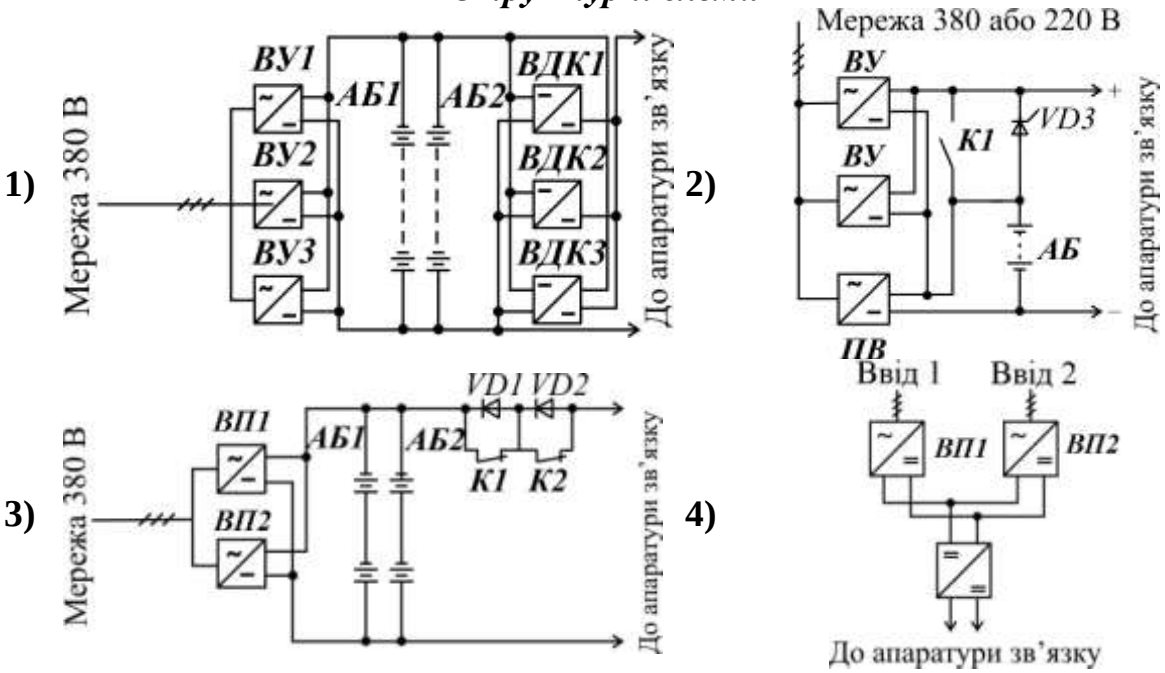
3.81 Обладнання підприємства зв'язку, як правило, забезпечується електроенергією постійного струму напругою мінус_____В. На діючих об'єктах для вітчизняного обладнання припускається використовування напруги мінус_____В, а для закордонного обладнання – напруги мінус_____В.

Відповідь:

В пунктах 3.82 … 3.85 установіть відповідність у вигляді комбінації цифр та літер, набравши, наприклад, 1в, 2а, ...

3.82 Типові схеми систем електроживлення постійного струму

Структурні схеми



ВП1, ***ВП2***, … – випрямні пристрої; ***АБ1***, ***АБ2***, … – акумуляторні батареї; ***VD1***, ***VD2*** – силові діоди; ***VD3*** – тиристор; ***ВДК1***, ***ВДК2***, … – вольтододаткові конвертори; ***К1***, ***К2*** – контактори

Тип схеми електроживлення:

а) система електроживлення з відокремленою від навантаження резервною акумуляторною батареєю;

б) буферна система електроживлення з вольтододатковими конверторами;

в) безакумуляторна система електроживлення;

г) буферна система електроживлення з нелінійними опорами.

Відповідь:

3.83 Джерела безперебійного живлення:

1) резервного типу (Off-Line чи Standby);

2) з подвійним перетворюванням енергії (On-Line);

а) у якому змінна мережна напруга, що надходить на вхід, перетворюється випрямлячем на постійну, а потім за допомогою інвертора – знову на змінну. Акумуляторну батарею постійно підімкнено до виходу випрямляча та входу інвертора і вона живить останній в аварійному режимі;

б) у якому комутуючий пристрій у нормальному режимі роботи забезпечує підмикання навантаження безпосередньо до зовнішньої мережі живлення, а в аварійному – переводить її на живлення від акумуляторних батарей.

Відповідь:

3.84 Використовування паливно-енергетичних ресурсів (*ПЕР*) та енергопостачання

Терміни:

1) раціональне використовування ***ПЕР***;
2) енергопостачання;
3) енергозберігаюча технологія.

Поняття та означення:

а) реалізація правових, організаційних, наукових, виробничих технологій та економічних заходів, спрямованих на ефективне (раціональне) використовування (й ощадливе витрачання) ***ПЕР*** і на залучення до господарського обороту поновлюваних джерел енергії;

б) новий чи удосконалений технологічний процес, що схарактеризовується більш високим коефіцієнтом корисного використовуання ***ПЕР***;

в) використовування паливно-енергетичних ресурсів, яке забезпечує досягнення максимальної за існуючого рівня розвитку техніки та технології ефективності, з урахуванням обмеженості їхніх запасів і дотримання вимог щодо зниження техногенного впливу на навколишнє середовище й інших вимог суспільства.

Відповідь:

3.85 Показники ефективності паливно-енергетичних ресурсів

Показники:

1) коефіцієнт корисної дії;
2) показник енергетичної ефективності;
3) коефіцієнт корисного використовування енергії.

Поняття та означення:

а) абсолютна, питома чи відносна величина споживання чи втрат енергетичних ресурсів для продукції якого завгодно призначення чи технологічного процесу;

б) відношення всієї корисно використовуваної у господарстві (на встановленій ділянці, енергоустановці тощо) енергії до сумарної кількості витраченої енергії в перерахуванні її на первинну;

в) величина, що характеризує досконаліть процесів перетворювання чи передавання енергії, що є відношенням корисної енергії до підведеної.

Відповідь:

ЧАСТИНА 2

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ВСТУП

Лабораторний практикум містить десять лабораторних робіт.

***Перелік лабораторних робіт модуля 1*:**

- лабораторна робота № 1.1 Дослідження режимів роботи випрямного пристрою (однофазної мостової схеми випрямляння та згладжувальних фільтрів);
- лабораторна робота № 1.2 Дослідження трифазних схем випрямлячів;
- лабораторна робота № 1.3 Дослідження однотактних керованих та некерованих випрямлячів.

***Перелік лабораторних робіт модуля 2*:**

- лабораторна робота № 2.1 Дослідження перетворювача постійної напруги із самозбудженням;
- лабораторна робота № 2.2 Дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів);
- лабораторна робота № 2.3 Дослідження півмостового перетворювача постійної напруги;
- лабораторна робота № 2.4 Дослідження тиристорного інвертора;
- лабораторна робота № 2.5 Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги;
- лабораторна робота № 2.6 Дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом;
- лабораторна робота № Ф1 Дослідження пристроїв та систем електроживлення модульної структури.

Методичні вказівки призначено для проведення лабораторних робіт з курсу «Електроживлення систем зв'язку». Методичні вказівки містять опис віртуальної лабораторії та лабораторних макетів, методичний матеріал щодо виконування робіт й опрацьовування результатів досліджень; питання стосовно підготовки та виконування роботи; контрольні тест-запитання; перелік рекомендованої літератури; рекомендації з теоретичного вивчення та експериментального досліджування застосовуваних у засобах телекомунікацій пристроїв та систем електроживлення.

В.1 Опис віртуальної лабораторії

Призначення

Віртуальна лабораторія призначена для проведення циклу лабораторних робіт з дисципліни «Електроживлення систем зв'язку».

Мета

Лабораторні роботи є одним з видів занять, що забезпечують студентам зв'язок теорії й практики. Як основні завдання лабораторних занять слід виокремити таке:

- експериментальне підтвердження теоретичних положень курсу;
- опрацьовування й закріплення студентами матеріалу лекцій;
- навчання студентів методики експериментального дослідження, опрацьовування дослідних даних, їхнього аналізу й порівнювання з теоретичними й розрахунковими даними;
- доповнення лекцій матеріалом, що входить у програму курсу ЕЖСЗ, який може слугувати за посібник для самостійної роботи студентів;
- введення елементів наукового пошуку при експериментальних дослідженнях.

Реалізація

Віртуальна лабораторія являє собою набір файлів, кожний з яких є готовим лабораторним макетом, призначеним для виконування конкретної лабораторної роботи. Для виконування досліджень є доволі скопіювати файл на комп'ютер і запустити його на виконування.

Функціональні можливості

Кожен лабораторний макет забезпечує такі можливості:

- дві мови інтерфейсу (українську, російську);
- збільшення швидкості обчислювання (для ЕОМ з обмеженими можливостями відеокарти);
- віртуальний багатоканальний осцилограф;
- змінювання параметрів окремих елементів (список редагованих елементів-залежить від теми лабораторної роботи);
- попереднє установлювання параметрів окремих елементів (що запобігає повторюваності результатів вимірювань у різних бригад);
- набір віртуальних контрольно-вимірювальних приладів (вольтметрів, амперметрів);

- оперативне регулювання параметрів окремих елементів (наприклад опору навантаження), що сприяє підвищенню швидкості виконування лабораторних робіт.

Швидкість моделювання

Швидкість моделювання залежить від потужності ЕОМ і теми лабораторного макета. При використовуванні сучасних ЕОМ та моделюванні низькочастотних схем (наприклад мостового випрямляча, що працює на частоті 50 Гц) швидкість моделювання перевищує швидкість протікання аналогічних процесів у реальному часі приблизно в 1,3 рази. Це є більше за швидкість моделювання аналогічних схем у програмних пакетах Micro-Cap або Electronic Workbench на аналогічних ЕОМ.

Особливості технічної реалізації

Окремо взятий лабораторний макет складається з таких основних частин (рис. В.1):

- панель керування моделюванням;
- панель елементів;
- робоча область;
- панель контрольно-вимірювальних приладів;
- панель регульованих параметрів.

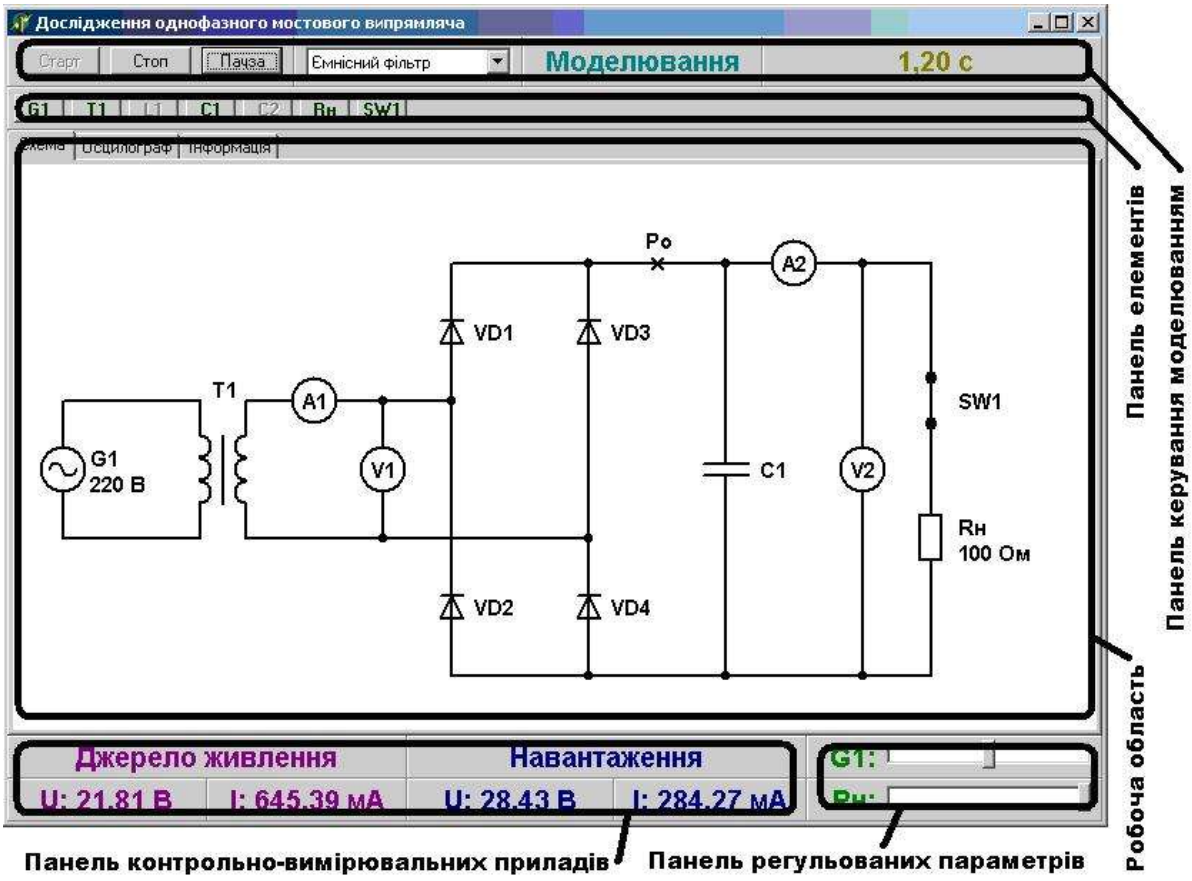


Рисунок В.1 – Побудова лабораторного макета

Панель керування моделюванням

За допомогою панелі керування моделюванням (рис. В.2) здійснюється:

- вибір досліджуваної схеми;
- керування процесом моделювання (запуск, припинення, пауза);
- контроль стану моделювання;
- контроль часу моделювання.

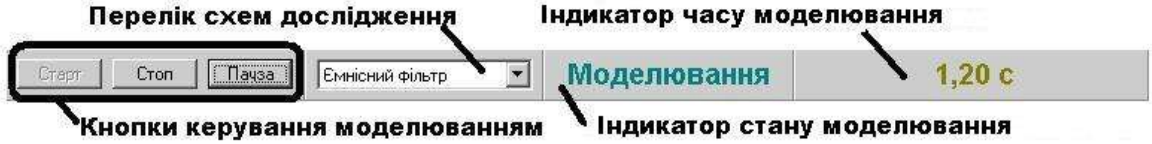


Рисунок В.2 – Панель керування моделюванням

За допомогою **кнопок керування моделюванням** здійснюється загальне керування моделюванням.

Кнопка **«Старт»** слугує для запуску процесу моделювання. При натисканні даної кнопки відбувається ініціалізація досліджуваної схеми (напруги й струми всіх елементів схеми дорівнюють нулю, час моделювання дорівнює нулю).

Кнопка **«Стоп»** слугує для припинювання процесу моделювання. Після натискання даної кнопки продовження моделювання можливе лише після ініціалізації схеми, однак у пам'яті віртуальних вимірювальних приладів (вольтметрів, амперметрів, осцилографа тощо) зберігаються останні результати моделювання (наскільки дозволяє буфер приладу).

Кнопка **«Пауза»** слугує для паузи моделювання. При цьому поточний стан схеми зберігається в пам'яті макета. Повторне натискання даної кнопки відновить моделювання без ініціалізації схеми.

Індикатор стану моделювання показує, в якому стані на даний момент перебуває лабораторний макет. Відсутність напису на цьому індикаторі свідчить про те, що процес моделювання зупинено. Напис **«Моделювання»** показує, що відбувається обчислення електричних процесів у досліджуваній схемі. Напис **«Пауза»** показує, що обчислення припинено.

Індикатор часу моделювання показує, яку кількість часу роботи досліджуваної схеми промодельовано. Швидкість обчислення залежить від багатьох чинників, першою чергою від потужності персонального комп'ютера й складності схеми. Тому швидкість обчислення зазвичай не збігається зі швидкістю протікання електричних процесів у реальному часі.

Список досліджуваних схем є індивідуальний для кожного лабораторного макета. Інформацію про список досліджуваних схем та їхній опис дивіться в документації на конкретний лабораторний макет. При виборі схеми з цього списку (точніше за змінювання поточної схеми) відбувається

ініціалізація лабораторного макета. Поточний стан моделювання при цьому зберігається. Наприклад, якщо макет перебував у стані моделювання, змінювання досліджуваної схеми відбудеться за таким алгоритмом: зупинка моделювання, ініціалізація обраної схеми, запуск моделювання.

Панель елементів

Панель елементів (рис. В.3) містить кнопки, натискання на які призведе до відкривання діалогових вікон редагування параметрів елементів. Надписи на кнопках відповідають позиційним номерам елементів у схемі. Залежно від обраної схеми редагування параметрів певних елементів може бути неможливе (якщо такі елементи у досліджуваній схемі не використовуються). Кожен лабораторний макет має власний набір елементів. Більш докладну інформацію про перелік елементів дивіться в документації на конкретний лабораторний макет.

Рисунок В.3 – Панель елементів

Робоча область

У даній версії віртуальної лабораторії робоча область може перебувати в одному з трьох станів:

- досліджувана схема;
- осцилограф;
- додаткова інформація.

Перемикання станів відбувається за допомогою перемикача, розташованого в лівому верхньому куті робочої області (рис. В.4).

Рисунок В.4 – Перемикач стану робочої області

У стані **«Схема»** в робочій області відбивається досліджувана схема. При цьому з робочої області можна відкрити діалогові вікна редагування параметрів елементів. Для цього потрібно підвести курсор миші до позиційного номера елемента. Якщо редагування параметрів є можливе, його

колір зміниться на червоний (рис. В.5). Для відкривання вікна редагування параметрів треба двічі клацнути лівою кнопкою миші.

Рисунок В.5 – Редагування параметрів елементів з робочої області

Якщо елемент має кілька фіксованих (дискретних) станів, наприклад вимикачі, перемикачі тощо, одноразове натискання миші на позиційному номері даного елемента призведе до змінювання його стану (рис. В.6). У разі з перемикачем, наприклад, останній буде по колу змінювати свій стан.

Рисунок В.6 – Керування вимикачем з робочої області

У стані **«Осцилограф»** в робочій області відбивається багатоканальний віртуальний осцилограф. Кількість каналів осцилографа залежить від конкретного лабораторного макета. Більш докладну інформацію про роботу з осцилографом дивіться нижче у відповідному розділі.

У стані **«Інформація»** на робочу область виводиться різна додаткова інформація, наприклад версія програми, дата створення тощо.

Панель контрольно-вимірювальних приладів

Панель контрольно-вимірювальних приладів (рис. В.7) містить інформацію про поточний стан віртуальних вимірювальних приладів типу вольтметра, амперметра тощо. Вона також може містити певну додаткову інформацію. Кожен лабораторний макет містить власний набір контрольно-вимірювальних приладів. Більш докладну інформацію про склад даного набору дивіться в документації конкретного лабораторного макета.

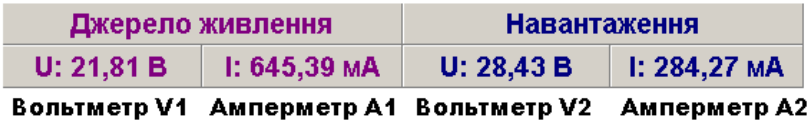


Рисунок В.7 – Панель контрольно-вимірювальних приладів

Панель регульованих параметрів

Така панель (рис. В.8) призначена для оперативного регулювання певних параметрів елементів, наприклад опору $R_н$ навантаження; вихідної напруги U_{G1} генератора ***G1***, коефіцієнта $к_з$ заповнювання сигналів керування $u_к(t)$ пристроя керування ***ПК***. Для зміни опору навантаження $R_н$ слід підвести курсор миші до відповідного повзунка, натиснути ліву кнопку й, не відпускаючи її, пересунути мишу ліворуч чи праворуч. Змінювання опору $R_н$ буде відбито на екрані. Дана панель частково дублює діалогові вікна редагування параметрів елементів, доступні з панелі елементів. Набір регульованих параметрів залежить від лабораторного макета. Більш докладну інформацію дивіться в документації на конкретний лабораторний макет.

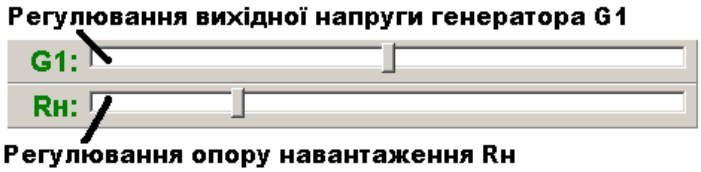


Рисунок В.8 – Панель регульованих параметрів

Гарячі клавіші

Лабораторним макетом можна керувати за допомогою клавіатури. Список гарячих клавіш наведено у табл. В.1.

Таблиця В.1 – **Список гарячих клавіш**

Клавіша	Функція
F2	Подати в робочій області досліджувану схему
F3	Подати в робочій області віртуальний осцилограф
F4	Подати в робочій області додаткову інформацію
F5	Розпочати моделювання
F6	Зупинити моделювання
F7	Призупинити моделювання (пауза)

Редагування параметрів елементів

Редагування параметрів елементів відбувається в діалогових вікнах редагування. Для кожного типу елемента існує власне діалогове вікно. Параметри складних вузлів та блоків, зреалізовуваних в лабораторному макеті у вигляді макроелементів, наприклад пристрою керування імпульсним перетворювачем постійної напруги, наведено в описах конкретних лабораторних макетів. Нижче наведено спосіб змінювання параметрів простих елементів, таких як резистори, конденсатори й т.п., на прикладі конденсатора *C1* з лабораторної роботи № 1.1.

Діалогове вікно редагування параметрів конденсатора подано на рис. В.9. З рисунка видно, що в даній лабораторній роботі цей елемент має два параметри: «Ємність» і «Активний опір». Вплив активного опору конденсатора в даній роботі не враховується, тому він становить 0 Ом і є недоступний для редагування. Ємність конденсатора може набувати будь-якого значення в діапазоні 50…10 000 мкФ (10 мФ). Після установлення нового значення ємності слід натиснути кнопку «Застосувати». Якщо введене значення є коректне, відбудеться змінювання ємності конденсатора, в іншому разі буде згенеровано повідомлення про помилку. Змінювання параметрів елементів відбуваються без зупинки моделювання. При цьому на екрані осцилографа можна спостерігати перехідні процеси, які відбуваються в досліджуваних колах.

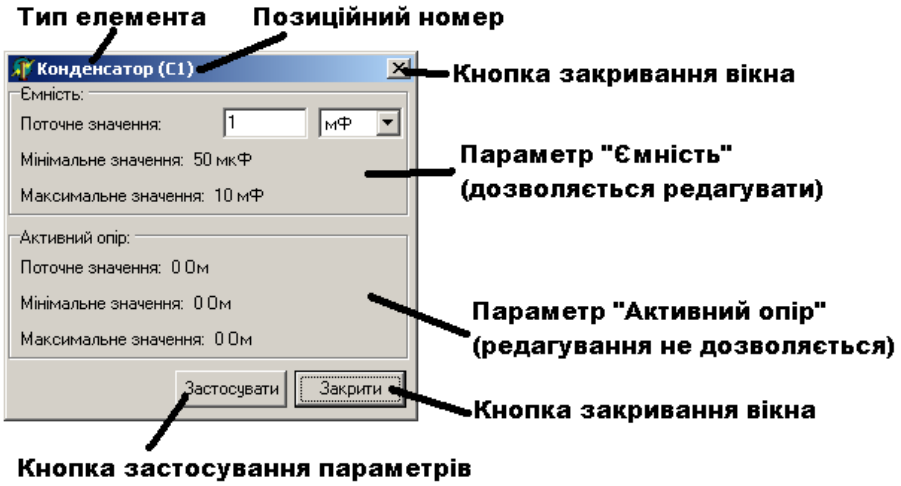


Рисунок В.9 – Діалогове вікно редагування параметрів конденсатора *C1*

Для елементів, які мають набір фіксованих станів (вимикачі, перемикачі тощо), діалогове вікно може мати вигляд, наведений на рис. В.10. Після встановлення нового стану елемента слід натиснути кнопку «Застосувати».

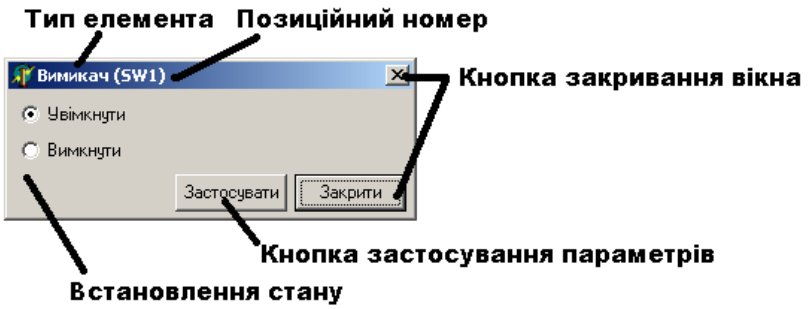


Рисунок В.10 – Діалогове вікно редагування параметрів вимикача *SW1*

Віртуальний осцилограф

Більшість лабораторних макетів містять у своєму складі віртуальний багатоканальний осцилограф, який відбивається в робочій області програми. Кількість каналів осцилографа залежить від конкретної роботи. Зовнішній вигляд осцилографа зображено на рис. В.11.

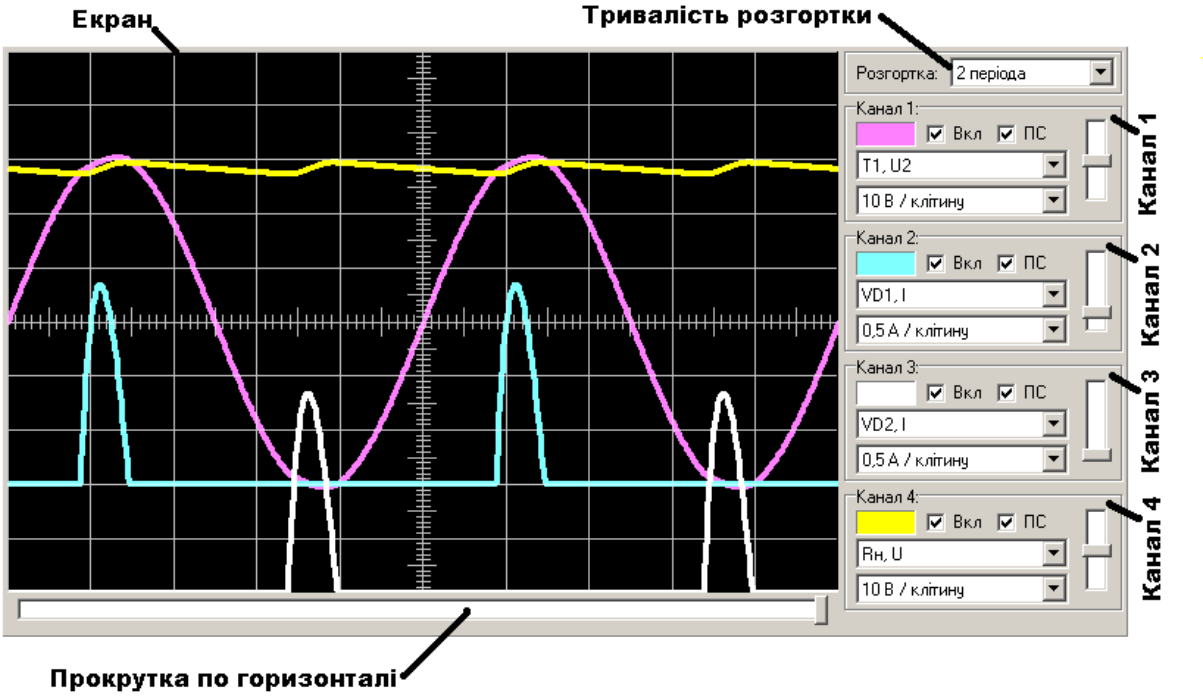


Рисунок В.11 – Зовнішній вигляд віртуального осцилографа

Осцилограф забезпечує:

- змінювання тривалості розгортки по горизонталі від **1 періоду/екран** до **100 періодів/екран**; при цьому забезпечується автоматична синхронізація;
- зсування зображення по горизонтальній осі на **10 клітин** ліворуч з інтервалом **0,1 клітин**;
- змінювання кольорів кожного з променів;
- вимикання кожного з променів;
- змінювання масштабу кожного з променів у межах від **1 мВ (мА)/клітин** до **0,5 кВ (кА)/клітин**;
- зсування по вертикалі кожного із променів на **5 клітин** вгору чи вниз з інтервалом **0,1 клітин**;
- вимикання постійної складової сигналу кожного з променів;
- можливість індикації в кожному промені електричних процесів, що відбуваються в елементах схеми (діаграми напруг та струмів);

- зберігання в пам'яті параметрів електричних процесів в елементах схеми останнього періоду моделювання.

Осцилограф має екран чорного кольору, на який нанесено вимірювальну сітку. У різних лабораторних макетах, задля зручності вимірювань, сітка на екрані осцилографа може мати різну кількість клітин по горизонталі й по вертикалі. У більшості макетів вимірювальна сітка має розмір 10x10.

Синхронізація осцилографа відбувається автоматично. Більш докладну інформацію про синхронізацію осцилографа дивіться в документації на конкретний лабораторний макет.

Тривалість розгортки обирається зі списку. Одиниці виміру розгортки можуть бути як абсолютними (наприклад 2 мс/клітину), так і відносними (наприклад 2 періоди/екран). У другому випадку промені проходять екраном за 2 періоди роботи елемента (чи вузла), що є синхронізуючим для даної схеми (наприклад генератор синусоїдної напруги чи пристроя керування імпульсним перетворювачем постійної напруги). Відносну розгортку установлено для зручності вимірювань. Докладну інформацію про одиниці виміру розгортки дивіться в документації на конкретний лабораторний макет. За змінювання тривалості розгортки відбудеться призупинення моделювання на період не більш 2 секунд.

Віртуальний осцилограф має буфер, у якому зберігаються останні результати досліджень. У процесі моделювання інформація в буфері невпинно оновлюється. При цьому неактуальні результати моделювання знищуються. У режимі паузи оновляння буфера не відбувається, тому, якщо в цьому режимі змінити, наприклад, точку підмикання каналу, на екрані все одно відіб'ються результати останніх обчислень. Інформацію щодо обсягу буфера дивіться в документації на конкретний лабораторний макет.

Робота осцилографа складається з двох етапів: заповнювання буфера результатами обчислень і побудова графіків. Побудова графіків здійснюється з буфера осцилографа.

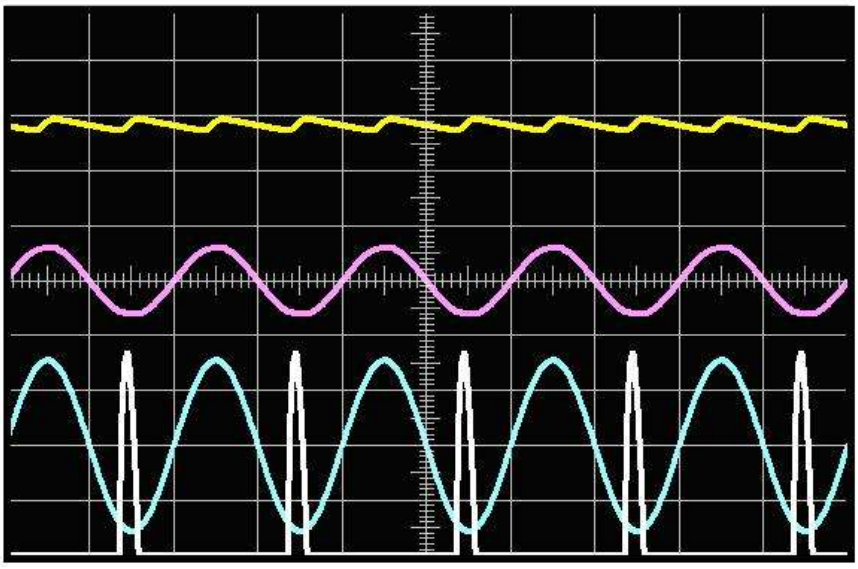
Очищення екрана осцилографа відбувається автоматично в міру відбивання графіків. Однак можливі кілька подій, за яких станеться примусове очищення екрана. До них належать:

- змінювання розмірів вікна програми;
- змінювання тривалості розгортки;
- змінювання будь-якої з настройок каналу в режимі паузи;
- прокручування зображення по горизонталі в режимі паузи.

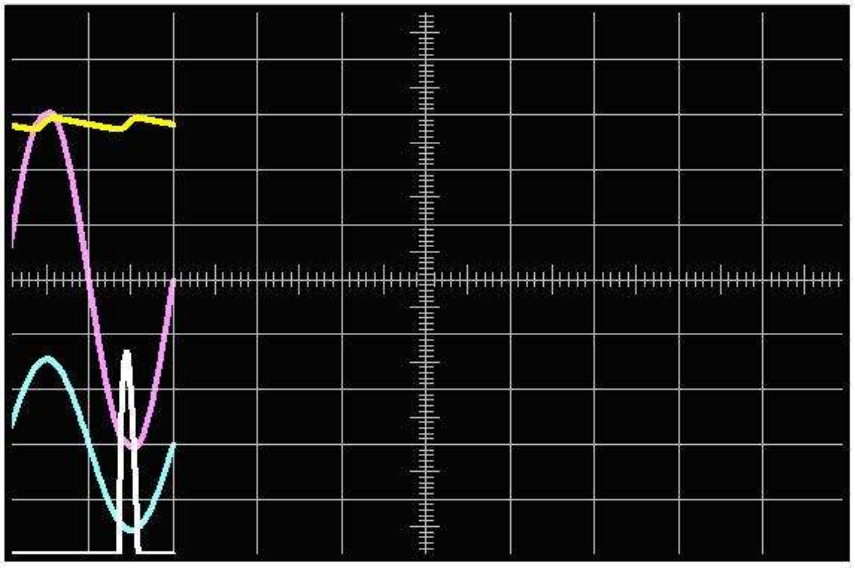
За примусового очищення екрана побудова зображення здійснюватиметься з буфера осцилографа. Попередні результати моделювання буде знищено. Такий момент подано на рис. В.12. З рисунка видно, що обсяг буфера осцилографа становить один період генератора синусоїдної напруги.

Органи керування каналом осцилографа подано на рис. В.13. Для змінення кольору променя слід двічі клацнути лівою кнопкою миші на кольоровій панелі. При цьому з'явиться стандартне діалогове вікно Windows, у якому можна обрати потрібний колір.

Досліджуваний параметр – точка (***u***) підмикання – обирається зі списку. Перелік досліджуваних параметрів дивіться в документації на конкретний лабораторний макет. Принцип роботи вимикача постійної складової сигналу зображено на рис. В.14.



Зображення на екрані в режимі паузи до змінення настройок каналу (видно результати попередніх досліджень)



Зображення на екрані у режимі паузи після змінення настройок каналу (зображення створюється з буфера осцилографа)

Рисунок В.12 – Рисування зображення на екрані осцилографа

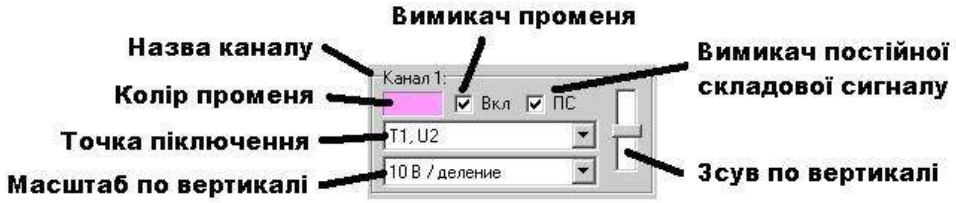


Рисунок В.13 – Органи керування каналом осцилографа

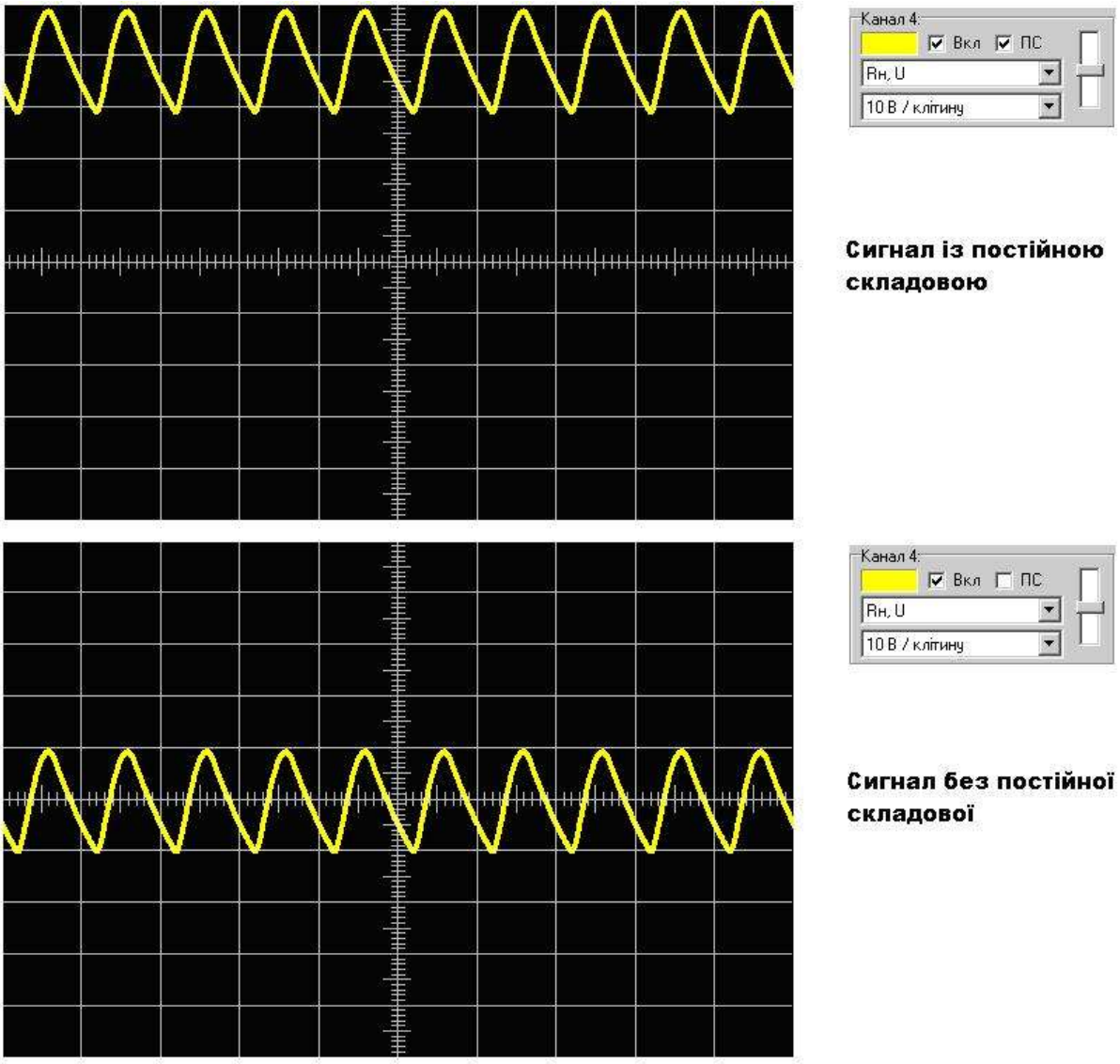


Рисунок В.14 – Принцип роботи вимикача постійної складової сигналу

МОДУЛЬ 1

1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ВИПРЯМНІ ПРИСТРОЇ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Лабораторна робота № 1.1
Дослідження режимів роботи випрямного пристрою (однофазної мостової схеми випрямляння та згладжувальних фільтрів)

1 Мета роботи

Вивчення принципів структурної, функціональної, схемотехнічної побудови й функціонування випрямних пристроїв, дослідження основних їхніх характеристик та особливостей роботи.

Експериментальна перевірка результатів обчислення основних електричних величин і показників однофазного мостового випрямляча.

Експериментальні дослідження фільтрувальних властивостей згладжувальних фільтрів випрямляча.

Освоєння методики експериментального визначання основних характеристик мостового випрямляча, який працює на різні типи навантаження.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С. 69 – 127.

2.2 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А.Бокуняев и др.; Под ред. В.Е.Китаева – М.: Радио и связь, 1988. – С. 87–128.

2.3 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / О.А. Доморацкий и др.; – М.: Радио и связь, 1981. – С. 79–138.

2.4 Китаев В.Е. и др.; Электропитание устройств связи: – М.: Связь, 1975. – С. 113–176.

2.5 Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 65–143.

3 Опис лабораторного макета

Лабораторний макет рис. 3.1 призначено задля дослідження мостової схеми випрямляча (схема Греца) на п'ять різних видів навантаження блока випрямляння ***БВ***: на активне навантаження (***k*** = 1); на індуктивне навантаження (***k*** = 2); на ємнісне навантаження (***k*** = 3); на **Г**-подібний ***LC***-фільтр (***k*** = 4); на **П**-подібний ***CLC***-фільтр (***k*** = 5). Стислий опис досліджуваних схем наведено в табл. 3.1

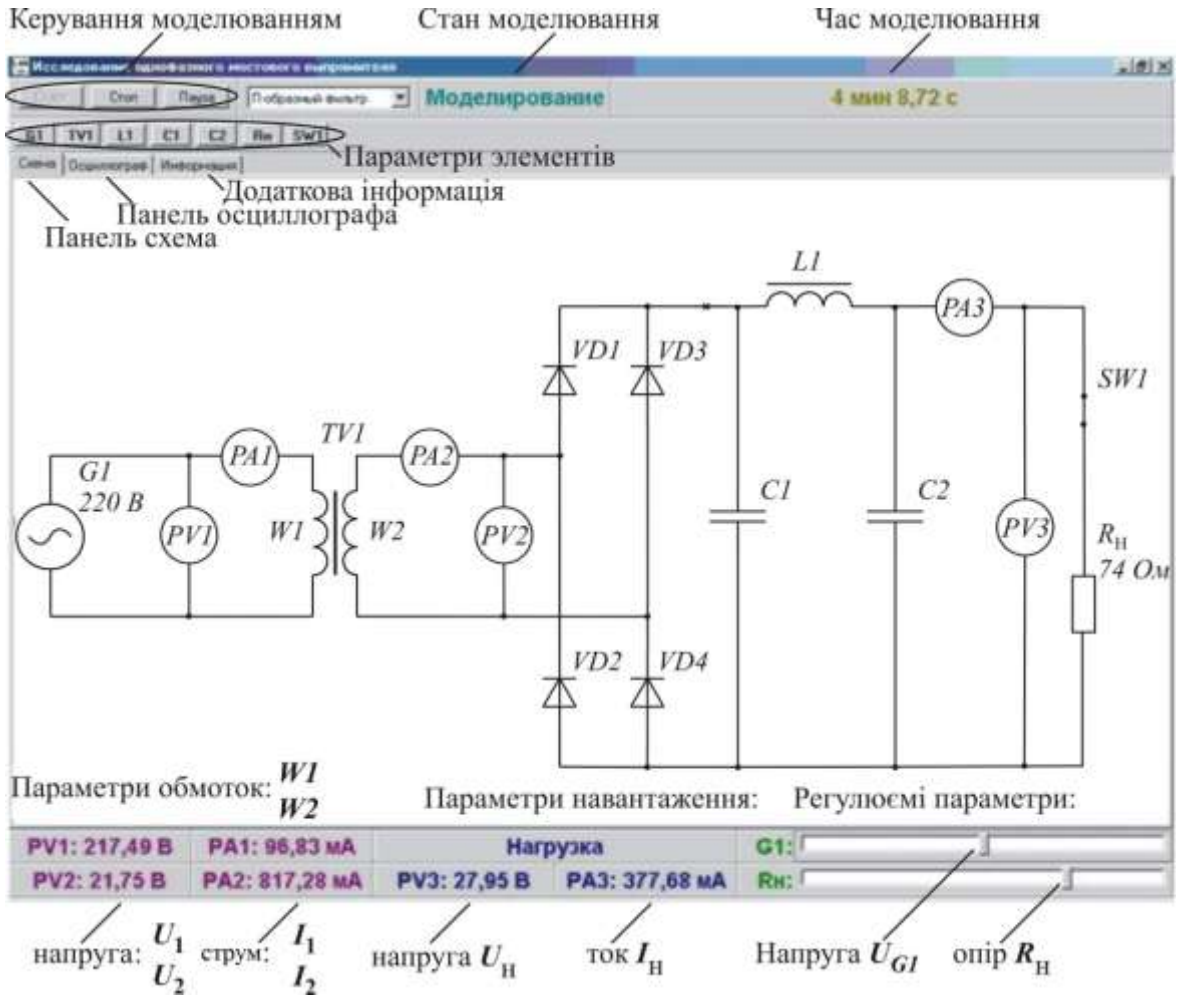


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Таблиця 3.1 **– Опис досліджуваних схем**

k	**Позначення в макеті**	**Опис**	**№ рис.**
1	Активне навантаження	Схема випрямляча без згладжувального фільтра з активним навантаженням. Елементи ***L1***, ***C1*** й ***C2*** не використовуються	3.2
2	Індуктивний фільтр	Схема випрямляча з активно-індуктивним навантаженням. Елементи ***C1*** й ***C2*** не використовуються	3.3
3	Ємнісний фільтр	Схема випрямляча з активно-ємнісним навантаженням. Елементи ***L1*** й ***C2*** не використовуються	3.4
4	Г-подібний фільтр	Робота випрямляча з Г-подібним ***LC*** фільтром. Конденсатор ***C2*** не використовується	3.5
5	П-подібний фільтр	Робота випрямляча з П-подібним ***LC*** фільтром	3.6

Лабораторний макет містить:

- джерело синусоїдної напруги ***G1***;
- трансформатор ***TV1***;
- блок випрямляння ***БВ*** – блок напівпровідникових діодів ***VD1…VD4***;
- згладжувальний фільтр – елементи ***C1, C2, L1***;
- регульований опір $R_н$ кола навантаження;
- вимикач ***SW1*** опору $R_н$ кола навантаження;
- чотириканальний осцилограф – "**Осцилограф**";
- вольтметр ***PV1*** напруги U_1 первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- амперметр ***PA1*** струму I_1 первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- вольтметр ***PV2*** напруги U_2 вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- амперметр ***PA2*** струму I_2 вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- вольтметр ***PV3*** вихідної напруги – напруги U_0 кола навантаження $R_н$;
- амперметр ***PA3*** струму I_0 навантаження $R_н$.

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1;*** трансформатора ***TV1***, який забезпечує узгодження напруги джерела первинного електроживлення з потрібною напругою навантаження; блока випрямляння ***БВ*** (***VD1…VD4***); згладжувального фільтра ***L1***, ***C1***, ***C2*** (залежно від схеми дослідження) та опору навантаження $R_н$, який може вимикатися за допомогою вимикача ***SW1***. Список елементів макета наведено в табл. 3.2. На панель регульованих параметрів виведено напругу генератора ***G1*** та опір резистора навантаження $R_н$.

Діючі значення напруги U_1 та струму I_1 первинної обмотки трансформатора ***TV1*** контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Діючі значення напруги U_2 та струму I_2 вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** контролюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***. Середні значення напруги $U_н = U_0$ та струму $I_н = I_0$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV3*** та амперметром ***PA3***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, що дозволяє спостерігати форму напруг і струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа відбувається автоматично відповідно до роботи генератора ***G1***. Тому тривалість розгортки проградуйована в частках періоду даного генератора й становить 0,1...100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено в табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

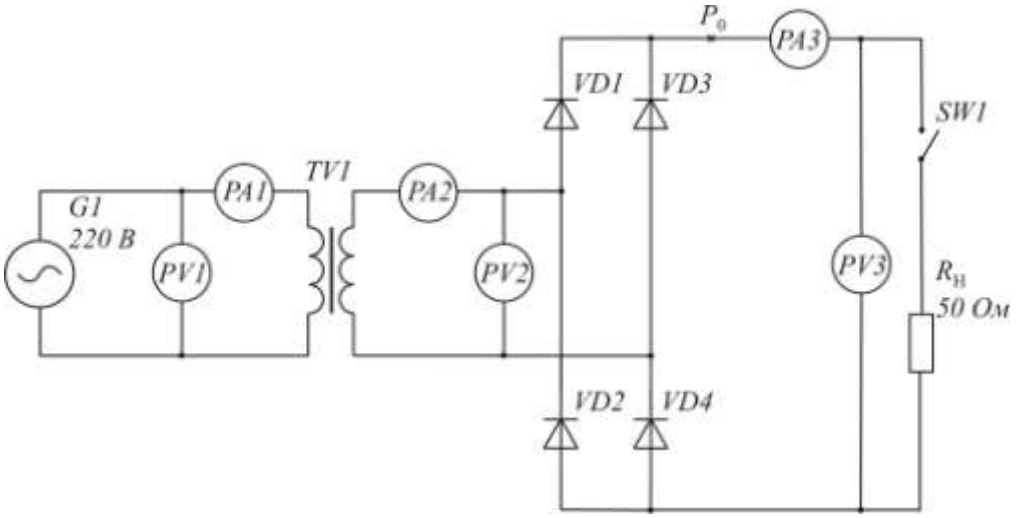


Рисунок 3.2 – Схема випрямляча з активним навантаженням (***k*** = 1)

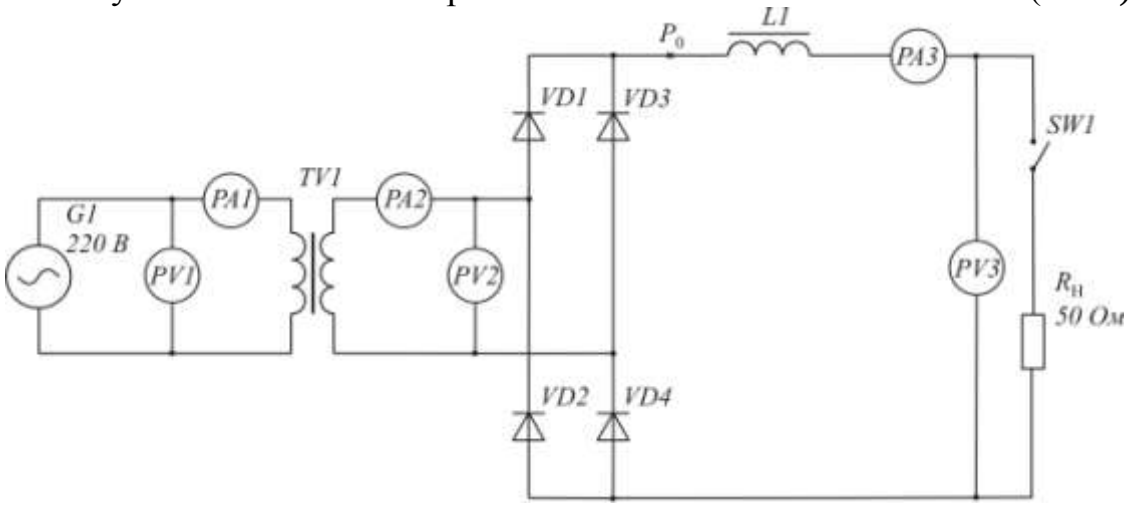


Рисунок 3.3 – Схема випрямляча з індуктивним навантаження (***k*** = 2)

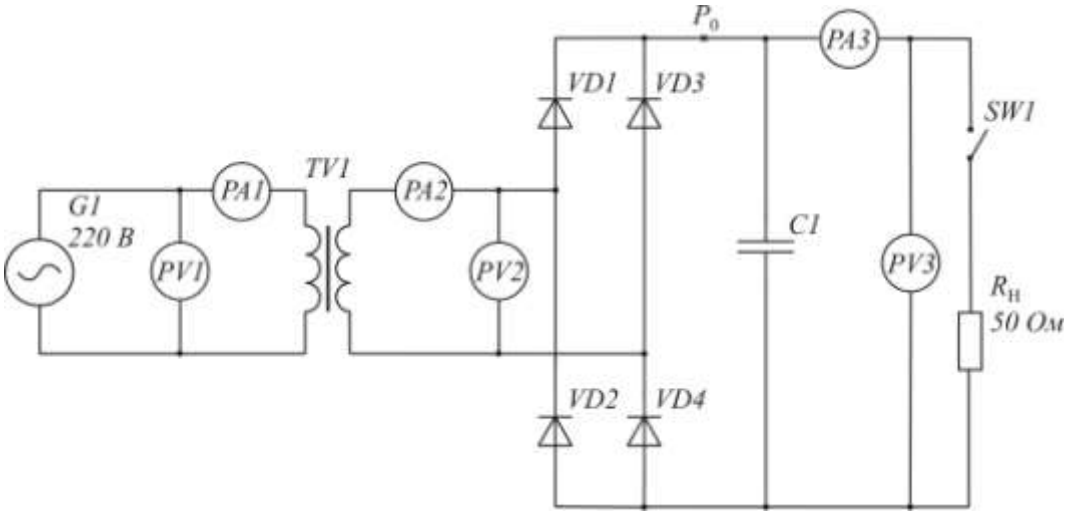


Рисунок 3.4 – Схема випрямляча з активно-ємнісним навантаженням (***k*** = 3)

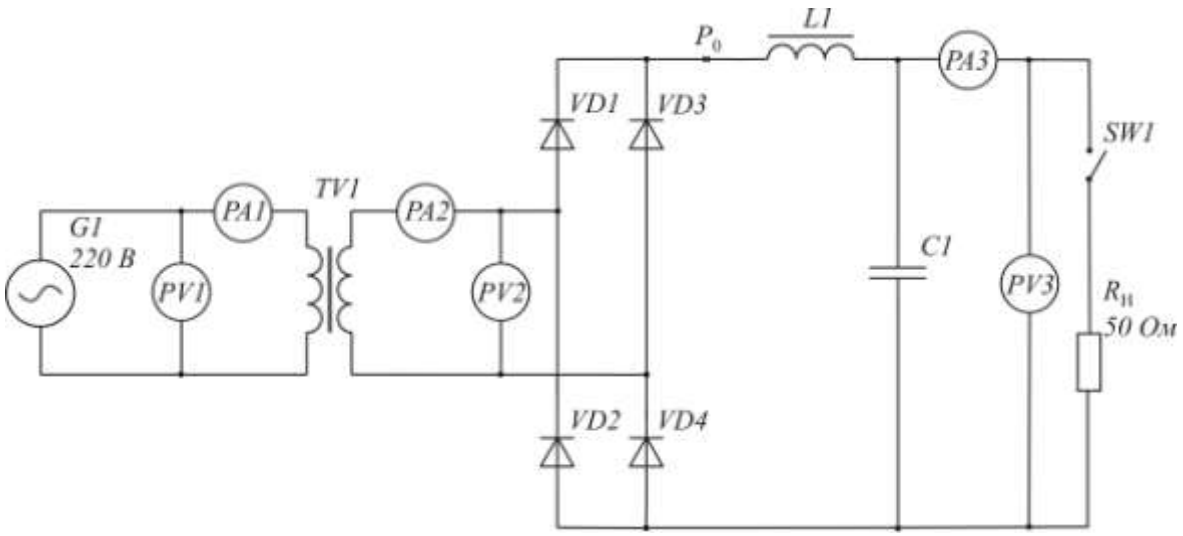


Рисунок 3.5 – Схема випрямляча з **Г**-подібним ***LC*** фільтром (***k*** = 4)

]

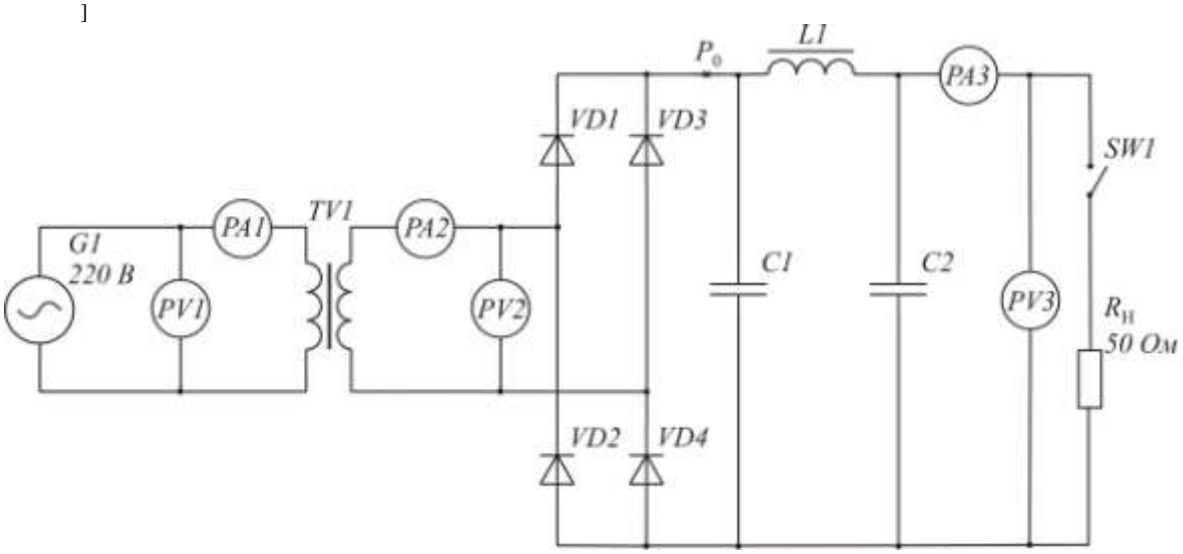


Рисунок 3.6 – Схема випрямляча з **П**-подібним ***CLC*** фільтром (***k*** = 5)

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови випрямних пристроїв;
- особливості та обмеження, які накладаються на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів пристроїв випрямляння;
- процеси функціонування в мостовій схемі випрямляння, діаграми напруг та струмів її елементів;
- особливості лабораторного макета;
- виведення основних розрахункових співвідношень за різних режимів роботи випрямляча.

Таблиця 3.2 - **Склад лабораторного макета**

Позиція	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		параметр	мін	макс	од. вим.	
G1	Генератор синусоїдної напруги	вихідна напруга	198	242	В	Діюче значення, оперативне регулювання
		частота	50	400	Гц	
TV1	Трансформатор	Коефіцієнт трансформації	5	15		
VD1	Діод					
VD2	Діод					
VD3	Діод					
VD4	Діод					
L1	Дросель	Індуктивність	0,01	10	Гн	Тільки для схем 2, 4, 5
C1	Конденсатор	Ємність	50	10 000	мкФ	Тільки для схем 3, 4, 5
C2	Конденсатор	Ємність	50	10 000	мкФ	Тільки для схеми 5
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Діюче значення
PV2	Вольтметр					Діюче значення
PA1	Амперметр					Діюче значення
PA2	Амперметр					Діюче значення
PV3	Вольтметр					Середнє значення
PA3	Амперметр					Середнє значення
P_0	Контрольна точка					

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де навести інформацію, потрібну, на думку студента, у подальшому для виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента схеми випрямляння, мету кожного досвіду, сподівані результати досліджень.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

4.6 Вивчити особливості електричних процесів, які відбуваються у різних частинах схеми випрямляча, що пояснюють зовнішні характеристики випрямляча $U_н = f(I_н)$ за активного, індуктивного та ємнісного характеру навантаження.

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	Осцилограми електричних процесів
TV1, U1	Напруга $u_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, I1	Струм $i_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, U2	Напруга $u_2(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, I2	Струм $i_2(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1***
VD1, U	Напруга $u_{VD1}(t)$ на діоді ***VD1***
VD1, I	Струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
VD2, U	Напруга $u_{VD2}(t)$ на діоді ***VD2***
VD2, I	Струм $i_{VD2}(t)$ діода ***VD2***
VD3, U	Напруга $u_{VD3}(t)$ на діоді ***VD3***
VD3, I	Струм $i_{VD3}(t)$ діода ***VD3***
VD4, U	Напруга $u_{VD4}(t)$ на діоді ***VD4***
VD4, I	Струм $i_{VD4}(t)$ діода ***VD4***
$R_н$, ***U***	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$
$R_н$, ***I***	Струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$
P_0 ***U***	Напруга $u_в(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ***
P_0 ***I***	Вихідний струм $i_в(t)$ блока випрямляння ***БВ***
C1, U	Напруга $u_{C1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{C1}(t)$ конденсатора ***C1***
C2, U	Напруга $u_{C2}(t)$ на конденсаторі ***C2***
C2, I	Струм $i_{C2}(t)$ конденсатора ***C2***
L1, U	Напруга $u_1(t)$ на дроселі ***L1***
L1, I	Струм $i_1(t)$ дроселя ***L1***

4.7 У протоколі зобразити схеми однофазного мостового випрямляча з ємнісним та індуктивним фільтрами, а також діаграми напруги $u_н(t)$ та струмів $i_н(t)$ у колі навантаження, $i_{VD1}(t)…i_{VD4}(t)$, діодів блока випрямляння, $i_м(t)$ джерела ***G1*** для активного, індуктивного та ємнісного характерів навантаження ідеального випрямляча.

5 Контрольні запитання

5.1 За яких обмежень виведено розрахункові співвідношення, що характеризують процес випрямляння в досліджуваній схемі за навантаження ємнісного та індуктивного характеру?

5.2 Що таке кут відсікання струму вентиля, чи залежить він від величини струму навантаження?

5.3 Чим пояснити нелінійний вигляд зовнішньої характеристики схеми випрямляння за навантаження ємнісного характеру?

5.4 Чи існують переваги роботи схеми на навантаження ємнісного характеру, якщо так, то в чому вони полягають?

5.5 Чому графік зовнішньої характеристики за навантаження ємнісного характеру розташовується над графіком зовнішньої характеристики навантаження індуктивного характеру?

5.6 В чому полягають переваги й недоліки мостової схеми випрямляння? Наведіть її порівняльну оцінку з іншими схемами випрямляння.

5.7 Що таке "коефіцієнт використовування трансформатора"?

5.8 Яку форму матиме струм у первинній обмотці трансформатора в мостовій схемі? В який спосіб ця форма пов'язана з формою струму у вторинній обмотці?

5.9 Від чого залежить величина змінної складової у випрямленій напрузі за навантаження ємнісного та індуктивного характеру?

5.10 Як визначити к. к. д. випрямляча теоретично й за даними, здобутими експериментально?

5.11 Поясніть роботу схеми випрямляча за активного, індуктивного та ємнісного характеру навантаження.

5.12 Поясніть діаграми випрямленої напруги $\boldsymbol{u_в(t)}$, струму $\boldsymbol{i_в(t)}$ у колі навантаження, струму через діод $\boldsymbol{i_д(t)}$, струму $\boldsymbol{i_2(t)}$ вторинної обмотки трансформатора за активного, індуктивного та ємнісного характеру навантаження.

5.13 Зробіть порівняння схем для різного характеру навантаження, використовуючи основні співвідношення струмів, напруг та потужностей.

5.14 Поясніть зовнішні характеристики випрямляча за роботи на активне, індуктивне та ємнісне навантаження.

5.15 У чому полягає відмінність поміж осцилограмами, здобутими при виконуванні даної лабораторної роботи, і осцилограмами, наведеними в домашньому завданні для індуктивного та ємнісного характерів навантаження?

5.16 Назвіть переваги й недоліки мостової схеми випрямляння в порівнянні з іншими однофазними схемами випрямлення.

5.17 Перелічіть всі типи згладжувальних фільтрів. Поясніть особливості їхнього функціонування.

5.18 Дайте означення основних параметрів згладжувальних фільтрів. Основні показники якості й вимоги, пропоновані щодо згладжувальних фільтрів.

5.19 Дайте порівняльну оцінку згладжувальних фільтрів, досліджуваних у даній лабораторній роботі.

5.20 У яких випадках доцільно використовувати фільтри, які складаються тільки з ємності чи лише з однієї індуктивності?

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити за рекомендованою літературою теоретичний матеріал щодо особливостей схемотехнічної реалізації мостової схеми випрямляння, процесів функціонування, області застосовування. Ознайомитися з принциповою схемою макета й особливостями його функціонування.

6.2 Розрахувати електричні параметри схеми випрямляння за роботи на навантаження з ємнісною реакцією.

6.3 Розрахувати електричні параметри схеми випрямлення за роботи на навантаження з індуктивною реакцією.

6.4 Дослідити схему однофазного мостового випрямляча на різні види k навантаження блока випрямляння ***БВ***: на активне навантаження (k = 1); на індуктивне навантаження (k = 2); на ємнісне навантаження (k = 3); на **Г**-подібний ***LC***-фільтр (k = 4); на **П**-подібний ***CLC***-фільтр (k = 5).

6.4.1 Дослідити зовнішні (навантажувальні) характеристики випрямляча.

6.4.2 Визначити вихідні опори випрямляча.

6.4.3 Визначити відсоткові зниження вихідних напруг випрямляча.

6.4.4 Дослідити фільтрувальні властивості згладжувальних фільтрів випрямляча $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, $S_U = f(I_н)$.

6.4.5 Дослідити процеси функціонування випрямляча.

6.5 Сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

7 Методика виконання лабораторної роботи

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови випрямних пристроїв та процеси їхнього функціонування за матеріалами даної лабораторної роботи й рекомендованою літературою [2.1...2.5]. Вивчити особливості схемотехнічного виконання й функціонування лабораторного макета (див. розд. 3). Одержати у викладача контрольні запитання з досліджуваного матеріалу й підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму й обсяг їхнього подання у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування лабораторної роботи без дозволу викладача. Обов'язковою умовою допуску до виконання роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд.3).

7.2 До пункту 6.2 Розрахунок електричних параметрів схеми випрямляння при її роботі на навантаження з ємнісною реакцією.

Розрахунок мостової схеми зводиться до визначення аналітичним шляхом величин напруг і струмів елементів схеми випрямляча.

Вихідні дані:

1) постійна складова випрямленого струму $I_0 = I_н = 0{,}5...5$ **А** і постійна складова випрямленої напруги $U_0 = \pm U_н = 20...30$ **В** (задаються викладачем);

2) коефіцієнт трансформації $n_{12} = 5...15…15$ трансформатора ***TV1***;

3) частота мережі живлення $f_м = 50…400$ **Гц**;

4) діюча напруга мережі живлення $U_м = U_{G1} = 198…242$ **В.**

У перебігу розрахунку визначається таке:

1) виконання умови роботи схеми випрямляння на навантаження з ємнісною реакцією, тобто

$$C_н >> 1/4\pi f_м m R_н,\ C_н >> 10/4\pi f_м m R_н;$$

2) основний розрахунковий коефіцієнт A, що зв'язує кут відсікання струму вентиля з параметрами схеми випрямляння, у вигляді

$$A = \mathrm{tg}\theta - \theta = \pi r_ф / m R_н ,$$

де $r_ф$ – активний опір фази схеми випрямляння, у цьому разі $r_ф = 0{,}1$ **Ом**; $m = 2$ – фазність схеми випрямляння;

3) ефективне значення напруги вторинної обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1*** (див. рис. 3.3):

$$U_2 = U_{2m} / \sqrt{2} = B U_{01},$$

де $B = f(A)$ визначається рівністю $B = 0{,}75 + 1{,}2A$ за $A \le 0{,}5$ або за графіком [2.4, с. 130; 2.2, с. 118];

4) середнє значення струму фази схеми випрямляння

$$I_{сер} = I_0/m;$$

5) ефективне (середньоквадратичне) значення струму вентиля

$$I_в = D I_{сер},$$

де $D = f(A)$ визначається рівністю $D = 2 + 1/27\ A$ за $A \le 0{,}5$ або за графіком [2.4, с. 130; 2.2, с. 119];

6) ефективне значення струму вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = D\sqrt{2} I_{сер} .$$

7) максимальне (амплітудне) значення струму діода та вторинної обмотки трансформатора:

$$I_{2m} = F I_{сер},$$

де $F = f(A)$ визначається рівністю $F = 5 + 0{,}25\ A$ за $A \le 0{,}5$ або за графіком [2.4, с. 132; 2.2, с.119];

8) ефективне значення струму $I_м = I_{G1}$, споживаного від джерела живлення, відповідно й струму I_1 первинної обмотки трансформатора:

$$I_{G1} = I_1 = I_м = n_{21} I_2 = I_2 / n_{12};$$

9) максимальна зворотна напруга, що виникає на вентилі,

$$U_{зворm} = 0{,}5(I + B\sqrt{2})U_0;$$

10) коефіцієнти використовування вентиля за напругою k_U та струмом k_i:

$$k_U = U_{звор} / U_0;\ k_i = I_{2m} / I_В;$$

11) коефіцієнт схеми

$$k_{сх} = U_0 / U_2;$$

12) коефіцієнт використовування трансформатора за потужністю

$$K_{тр} = P_0 / S_{тр} = 2K_1K_2 / (K_1 + K_2) = \sqrt{2} / BD,$$

де $K_1 = P_0/S_1$, $K_2 = P_0/S_2$ – коефіцієнт використовування відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора;

$S_1 = I_м U_м$; $S_2 = I_2 U_2$; $S_{тр} = 0{,}5\ (S_1 + S_2)$ – повні (габаритні) потужності обмоток первинної, вторинної й трансформатора відповідно, **ВА**;

$P_0 = U_0 I_0 = U_н I_н$ – корисна потужність на виході випрямляча, **Вт**.

Результати розрахунку відбити в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – **Результати досліджень**

Величини навантаження		I_0, А	U_0, В	$I_{сер}$, А	$I_В$, А	I_{2m}, А	$I_м$, А	$U_м$, В	U_2, В	I_2, А	A	B	D	F	θ	k_U	k_i	$K_{сх}$	$K_{тр}$
Ємнісне навантаження	розр.							220											
	експ.							220											
Індуктивне навантаження	розр.			-	-	-	-	220											
	експ.			-	-	-	-	220											

7.3. До пункту 6.3. Розрахунок електричних параметрів схеми випрямляння за її роботи на навантаження з індуктивною реакцією.

Розрахунок схеми здійснюється за такими вихідними даними:

1) постійна складова випрямленого струму I_0 = **0,5...5 А** (задається викладачем);

2) постійна складова випрямленої напруги U_0 = **20...30 В** (задається викладачем);

3) коефіцієнт трансформації трансформатора n_{12} = **5...15**;

4) активний опір котушки індуктивності L фільтра становить $R_ф$ = **0,05 Ом**;

5) частота мережі живлення $f_м$ = **50…400 Гц**, напруга $U_м$ = **198…242 В.**

У перебігу розрахунку визначається таке:

1) напруга вторинної обмотки трансформатора

$$U_2 = (U_0 + \Delta U_\phi)/\sqrt{2}\,\frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m} = (U_0 + \Delta U_\phi)/g\,,$$

де ΔU_ϕ – спадіння постійної складової випрямленої напруги на активному опорі котушки індуктивності L фільтра; g – коефіцієнт схеми випрямляння;

2) напруга первинної обмотки трансформатора

$$U_1 = U_м = U_{G1} = U_2/n_{21} = U_2 n_{12};$$

3) ефективне значення струму через вентиль

$$I_в = I_0/\sqrt{m}\;;$$

4) ефективне значення струму вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = \sqrt{2}\,I_В;$$

5) ефективне значення струму первинної обмотки трансформатора та струму споживаного з мережі,

$$I_1 = I_м = I_{G1} = n_{21}\sqrt{2/m}\;;$$

6) максимальна зворотна напруга на вентилі

$$U_{зворmax} = 0{,}5\pi\sqrt{2}gU_{2m}/m = \pi gU_2/m = \pi(U_0 + \Delta U_\phi)/m\;;$$

7) коефіцієнти використовування вентиля за напругою k_U та струмом k_i:

$$k_U = \pi/2\;;\;\; k_i = 0{,}707;$$

8) коефіцієнт схеми

$$k_{сх} = U_0/U_2;$$

9) коефіцієнти використовування трансформатора за потужністю:

$$K_1 = P_0'/S_1;\quad K_2 = P_0'/S_2;\quad K_{ТР} = P_0'/S_{ТР},$$

де $P_0' = P_0 + P_\phi = I_0(U_0 + \Delta U_\phi);\; S_1 = I_м U_м;\; S_2 = I_2 U_2.$

Результати розрахунку занести до таблиці 7.1.

7.4 До пункту 6.4. Дослідження роботи мостового випрямляча на різні види ***k*** *навантаження блока випрямляння* ***БВ****: на активне навантаження (****k*** *= 1); на індуктивне навантаження (****k*** *= 2); на ємнісне навантаження(****k*** *= 3); на* ***Г****-подібний* ***LC****-фільтр (****k*** *= 4); на* ***П****-подібний* ***CLC****-фільтр (****k*** *= 5).*

Забезпечення необхідного варіанта ***k*** навантаження блоку випрямлення ***БВ*** мостового випрямляча здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Задля забезпечення потрібних параметрів елементів схеми та режимів роботи досліджуваної схеми випрямляча може бути використано кнопки швидкого доступу **“*G1*”, “*TV1*”, “*L1*”, “*C1*”, “*C2*”, “$R_н$”, “*SW1*”** (див. рис. 3.1).

7.4.1 До пункту 6.4.1 Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик випрямляча.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги $U_н$ у колі навантаження випрямляча від струму $I_н$ навантаження: $U_н = f(I_н)$.

Методика дослідження зовнішніх характеристик припускає виконання таких кроків:

- обрати перемикачем вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) потрібну схему дослідження випрямляча – "**Активне навантаження**" (***k*** = 1 – рис. 3.2), "**Індуктивне навантаження**" (***k*** = 2 – рис. 3.3), … ;
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напругу $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, потрібну частоту $f_м$), використовуючи кнопку **"*G1*"** на панелі елементів (див. рис. 3.1) для появи вікна редагування;
- відредагувати параметри трансформатора ***TV1*** – значення коефіцієнта n_{12} трансформації трансформатора (див. рис. 3.1 – кнопка "***TV1***");
- відредагувати параметри елементів ***L1, C1, C2*** згладжувального фільтра випрямляча, використовуючи кнопки на панелі редагування (див. рис. 3.1) відповідно "***L1***", **"*C1*"**, **"*C2*"**, установити їм номінальні значення відповідно $L1_{ном}$, $C1_{ном}$, $C2_{ном}$;
- вимкнути за допомогою вимикача ***SW1*** навантаження $R_н$ мостової схеми випрямляння;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку "**Старт**";
- зняти покази вольтметра ***PV3*** – вихідну напругу $U_{н\ нс}$ у режимі ненавантаженого стану, результат занести до таблиці 7.2 (***k***);
- підімкнути навантаження $R_н$;
- змінюючи опір $R_н$ навантаження від максимуму (мінімуму) до мінімуму (максимуму), зняти покази вихідної напруги $U_н$ та струму $I_н$ навантаження $R_н$. Виміряні параметри занести до таблиці 7.2 (***k***).

За результатами дослідження побудувати зовнішні характеристики.

Таблиця 7.2 (*k*) – **Результати досліджень**

$R_н$, Ом	∞	100	50	25	15	10	5	3	1
$U_н$, В									
$I_н$, А									
$\Delta U_н$, В									
$\Delta I_н$, А									
$r_в$, Ом									

7.4.2 До пункту 6.4.2. Визначення вихідних опорів випрямляча.

Вихідні опори $r_{в}$ випрямляча визначаються на підставі здобутих результатів вимірювань п. 7.4. 1 (див. табл. 7.2 (***k***)):

$$r_{в} = \Delta U_{н} / \Delta I_{н};$$

$$\Delta U_{н} = U_{н\,max} - U_{н};\ \ \Delta I_{н} = I_{н\,max} - I_{н},$$

де $U_{н\,max}$, $I_{н\,max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження (див. табл. 7.2 (***k***)).

Результати розрахунків $\Delta U_{н}$, $\Delta I_{н}$, $r_{в}$ занести до таблиці 7.2 (***k***).

7.4.3 До пункту 6.4.3. Визначення відсоткових знижень вихідних напруг випрямляча.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги випрямляча при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\,нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається за результатами досліджень п. 7.4.1 (див. табл. 7.2 (***k***)):

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\,нс} - U_{н\,ном}}{U_{н\,нс}} \cdot 100\% .$$

7.4.4 До пункту 6.4.4. Дослідження фільтрувальних властивостей згладжувальних фільтрів мостового випрямляча.

Для вимірювання параметрів змінних складових на виході блока випрямляння ***БВ,*** частоти $f_{ви}$ і розмаху $\Delta U_{в\sim}$ напруги $u_{в}(t)$ і розмаху $\Delta I_{в\sim}$ струму $i_{в}(t)$ слід підімкнути (див. рис. В.13 розд. В.1) осцилограф до контрольних точок: у першому випадку до "P_0,U" – напруга $u_{в}(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ***, а у другому – до ***"P_0, I"*** (струм $i_{в}(t)$ на виході ***БВ*** – див. табл. 3.3).

Для вимірювання параметрів змінних складових у колі навантаження випрямляча – частоти $f_{ни}$ і розмаху $\Delta U_{н\sim}$, напруги $u_{н}(t)$ і розмаху $\Delta I_{н\sim}$ струму $i_{н}(t)$ – слід підімкнути осцилограф (див. рис. В.13 розділу В.1) до контрольних точок: у першому випадку – до ***"$R_{н}$, U"*** – напруга $u_{н}(t)$ навантаження $R_{н}$ випрямляча (див. табл. 3.3), а у другому – ***"$R_{н}$, I"*** – струм $i_{н}(t)$ у колі навантаження $R_{н}$ випрямляча.

Експериментальні значення частот $f_{ви}$ та $f_{ни}$ досліджуваних процесів визначаються за осцилограмами відповідно $u_{в}(t)$ та $u_{н}(t)$. Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду T спостережуваної кривої, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал T визначається добутком двох величин $T = nl$: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю в поділках і значення величини n часу на поділку у даному положенні перемикача **"Час/Поділка"**. У цьому разі

$$f = 1/T = 1/nl.$$

При вимірюванні параметрів змінних складових ($f_{ви}$, $\Delta U_{в\sim}$, $\Delta I_{в\sim}$, $f_{ни}$, $\Delta U_{н\sim}$, $\Delta I_{н\sim}$) осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової ПС вимкнено – рис. В.13 розд. В.1) підсилювача вертикального посилення.

Методика дослідження фільтрувальних властивостей згладжувальних фільтрів припускає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до таблиці 7.3 (***k***)):

- обрати перемикачем вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) потрібну схему дослідження випрямляча – "**Активне навантаження**" (***k*** **=** 1 – рис. 3.2), "**Індуктивне навантаження**" (***k*** **=** 2 – рис. 3.3), … ;
- відредагувати параметри трансформатора ***TV1*** – значення коефіцієнта n_{12} трансформації трансформатора (див. рис. 3.1 – кнопку "***TV1***");
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напругу $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, потрібну частоту $f_м$), використовуючи кнопку ***"G1"*** на панелі елементів (див. рис. 3.1) задля появи вікна редагування;
- відредагувати параметри елементів ***L1, C1, C2*** згладжувальних фільтрів випрямляча, використовуючи кнопки відповідно ***"L1", "C1", "C2***" на панелі редагування (див. рис. 3.1)**,** установити їм номінальні значення відповідно $L1_{ном}$, $C1_{ном}$, $C2_{ном}$;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"** – рис. 3.1;
- установити опір $R_н = R_{ном}$ у колі навантаження випрямляча, використовуючи орган регулювання – повзунок "$R_н$" (див. рис. 3.1), що забезпечує значення струму $I_н = I_{н\ ном}$;
- зняти покази індикації опору $R_н$**,** вольтметра ***PV3*** й амперметра ***PA3***. Результати вимірювань $R_н$, $U_н$ й $I_{н\ ном}$ занести до таблиці 7.3 (***k***);
- виміряти розмах $\Delta U_{в\sim}$ і частоту $f_{ви}$ пульсації напруги на виході блоку випрямлення **БВ** за осцилограмою напруги напруги $u_в(t)$ (контрольна точка P_0, U відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{в\sim}$ пульсації струму на виході блока випрямляння ***БВ*** за осцилограмою напруги $i_в(t)$ (P_0, I);
- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження випрямляча за осцилограмою напруги напруги $u_н(t)$ (контрольна точка $R_н$, U відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{н\sim}$ пульсації струму в колі навантаження випрямляча за осцилограмою напруги $i_н(t)$ ($R_н$, I – табл. 3.3);
- виконати аналогічні вимірювання за струмів $I_н$ навантаження, $0{,}75I_{н\ ном}$, $0{,}5I_{н\ ном}$ й $0{,}25I_{н\ ном}$, використовуючи орган регулю-

вання – повзунок "$R_н$:" – див. рис. 3.1 (результати досліджень занести до таблиці 7.3 (***k***));

- дослідження з даної методики виконати для всіх видів ***k*** навантаження блока випрямляння **(*k* = 1, 2, … , 5)**;
- виконати аналогічні вимірювання за різних значень ємності ***C1*** для варіантів ***k* = 3, 4, 5** – результати досліджень занести до таблиці 7.4 (***k*);**
- виконати аналогічні вимірювання за різних значень індуктивності дроселя ***L1*** для варіантів ***k* = 2, 4, 5** – результати досліджень занести до таблиці 7.3 (***k***);
- використовуючи результати експерименту (таблиці 7.3 (***k*),** 7.4 (***k*),** 7.5 (***k***)), розрахувати й заповнити розрахункову частину даних таблиць з урахуванням наведених нижче співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначити нормовані частоти:

$$\overline{f}_{вц} = f_{вц} / f_м; \qquad \overline{f}_{нц} = f_{нц} / f_м .$$

Коефіцієнти пульсацій на виході блока випрямляння ***БВ*** (струму $K_{пв}$ і напруги $K_{пвU}$), у колі навантаження (струму $K_{пн}$ і напруги $K_{пнU}$) випрямляча:

$$K_{пв} = \frac{\Delta I_{в\sim}}{2I_н}; \quad K_{пн} = \frac{\Delta I_{н\sim}}{2I_н};$$

$$K_{пвU} = \frac{\Delta U_{в\sim}}{2U_н}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_н}.$$

Коефіцієнти згладжування за струмом S_i та напругою S_U визначаються з урахуванням коефіцієнтів пульсації:

$$S_i = K_{пв} / K_{пн}, \quad S_U = K_{пвU} / K_{пнU}.$$

Результати розрахунків $\overline{f}_{вu}$, $\overline{f}_{нu}$, $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, S_U відбити в таблицях 7.3 (***k***), 7.4 (***k***), 7.5 (***k***).

За результатами досліджень побудувати робочі характеристики $K_{пвU}, K_{пнU}, S_i, S_U = f(I_н, C1, L1)$.

Таблиця 7.3 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина								Розрахункові дані							
	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{вu}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$\Delta f_{нu}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{вu}$	$\overline{f}_{нu}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1																
2																
…																

Таблиця 7.4 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина									Розрахункові дані							
	***C1*, мкФ**	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1 2 …																	

Таблиця 7.5 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина									Розрахункові дані							
	***L1*, мГн**	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1 2 …																	

7.4.5 До пункту 6.4.5. Дослідження процесів функціонування випрямляча

Оберіть перемикачем вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) потрібну схему дослідження випрямляча – "**Активне навантаження**" (***k* =** 1 – рис. 3.2), "**Індуктивне навантаження**" (***k* =** 2 – рис. 3.3), … .

Встановіть, використовуючи орган регулювання (повзунок "$R_н$" – рис. 3.1) опору навантаження $R_н$, струм $I_н$, який дорівнює номінальному значенню $I_н = I_{н\ ном.}$ Зарисуйте осцилограми напруги $u_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1***, струму $i_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1,*** струмів $i_{VD1}(t)$, $i_{VD2}(t)$, $i_{VD3}(t)$, $i_{VD4}(t)$ відповідно діодів ***VD1, VD2, VD3, VD4***, вихідного струму $i_в(t)$ випрямляча напруги $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$ й т. д. (відповідно до табл. 3.3). При зображенні осцилограм слід дотримуватись однакового масштабу на осі часу, початки координат кожного графіка повинні перебувати на одній вертикальній лінії.

Обов'язково слід прагнути при зображенні осцилограм зберігати їхні амплітудні й часові співвідношення, тому що це є суттєво для аналізу. Тривалість розгортки осцилографа добирають у такий спосіб, щоби на робочій частині екрана містилося 1,5...2 періоди спостережуваної осцилограми. Під кожною зображеною осцилограмою слід позначити, до якої фізичної величини вона належить.

Кут відсікання струму **θ** в режимі ємнісного навантаження визначається в розрахунковій частині зі співвідношення $A = \mathrm{tg}\ \theta - \theta$, а в перебігу

експериментальної перевірки – за осцилограмою струму $i_в(t)$ на виході блока випрямляння. За осцилограмою визначають величину T – період повторювання імпульсів струму в лінійних одиницях екрана осцилографа – і величину t_i – тривалість імпульсу струму – у таких самих лінійних одиницях. Після цього відзнаходять величину θ, використовуючи рівність

$$\theta = 360\, t_i/2T, \text{ ел. град.}$$

Щоби експериментальним шляхом відзнайти значення A, слід перейти до радіанної міри величини θ ($\theta = 360\, t_i/2T$, ел. град.).

Параметри B, D, F визначаються у зазначений у поясненні до п. 6.2 спосіб з використанням здобутого значення A. Величини $I_в$ (діюче значення струму вентиля), I_{2m} (максимальне значення струму вентиля), $K_{тр}$ (коефіцієнт використовування трансформатора за потужністю) розраховуються за експериментальними даними з використанням співвідношення п. 7.2 (або п. 7.3).

Порівнювання розрахунку та експерименту здійснюється шляхом зіставляння величин, обмірюваних приладами або розрахованих за їхніми показниками з відповідними величинами перевірного розрахунку. Результати вимірювань та розрахунку зводяться до таблиці 7.1 (за $I_{н\ ном} = I_0$ й $U_{н\ ном} = U_0$).

7.5 До пункту 6.5. Висновки за результатами роботи.

Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даного методичного посібника.

Використовуючи результати досліджень за пунктами 6.1...6.5, зобразіть в одній системі координат зовнішні характеристики випрямляча $U_н = f(I_н)$.

Висновки щодо виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, в яких має бути розкрито суть розглянутих явищ чи здобутих графічних залежностей. Висновки повинні не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, з'ясовуючи засадничу відмінність одного випадку від іншого (наприклад, відмінності у формі струму через вентиль за різного характеру навантаження, нелінійність чи то, навпаки, лінійність зовнішньої характеристики тощо). У висновках має бути відбито осмислення результатів лабораторного дослідження. Поміж відповідями на контрольні запитання й висновками щодо роботи має існувати безпосередній зв'язок. Проробляння контрольних запитань дозволить його виявити. Висновки не повинні повторювати змісту роботи (розділ 6).

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 схеми й діаграми роботи однофазного мостового випрямляча на різні види навантаження (***k*** = 1, 2, … ,5) блока випрямлення ***БВ***: на активне навантаження (***k*** = 1); на індуктивне навантаження (***k*** = 2); на ємнісне навантаження (***k*** = 3); на **Г**-подібний ***LC***-фільтр (***k*** = 4); на **П**-подібний ***CLC***-фільтр (***k*** = 5).

8.2 результати досліджень відповідно до пп. 6.4.1...6.4.5:

- таблиці з результатами експерименту й розрахунку;
- графіки робочих характеристик:

$$U_{н}, \Delta U_{н}, r_{в} = f(I_{н});$$

$$K_{пвU}, K_{пнU}, S_i, S_U = f(I_{н}, C1, L1);$$

- осцилограми досліджуваних напруг та струмів в елементах і колах схеми випрямного пристрою;

8.3 висновки щодо аналізу результатів дослідження.

Лабораторна робота № 1.2
Дослідження трифазних схем випрямлячів

1 Мета роботи

Вивчення принципів побудови й функціонування схем випрямних пристроїв та особливостей їхньої схемотехнічної реалізації.

Вивчення принципів функціонування трифазних однотактної і двотактної мостової схем випрямляння. Експериментальне дослідження їхніх характеристик та електромагнітних процесів.

Освоєння методики експериментального визначання основних характеристик багатофазних випрямлячів.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С. 69 – 127.

2.2 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А.Бокуняев и др.; Под ред. В.Е.Китаева – М.: Радио и связь, 1988. – С. 87–128.

2.3 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / О.А. Доморацкий и др.; – М.: Радио и связь, 1981. – С. 79–138.

2.4 Китаев В.Е. и др.; Электропитание устройств связи: – М.: Связь, 1975. – С. 113–176.

2.5 Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 65–143.

3 *Опис лабораторного макета*

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження трифазних схем випрямляння двох типів (трифазної однотактної – $k = 1$ та трифазної мостової – $k = 2$) за активного й індуктивного характеру навантаження.

Стислий опис досліджуваних схем наведено у табл. 3.1, список елементів макета – в табл 3.2, список досліджуваних параметрів – в табл. 3.3, список елементів макета – в табл 3.2.

Лабораторний макет містить:

- джерело (генератор) ***G1*** трифазної синусоїдної напруги;
- трифазний трансформатор ***TV1***;
- блок випрямляння ***БВ*** – блок напівпровідникових діодів ***VD1…VD3*** (трифазна однотактна схема) і ***VD1…VD6*** (трифазна мостова схема);

- згладжувальний фільтр, утворений дроселем ***L1***;
- опір $R_н$ навантаження випрямляча;
- вимикач ***SW1*** навантаження $R_н$ випрямляча;
- вимикач ***SW2*** дроселя ***L1***;
- чотириканальний осцилограф – **“Осцилограф”**;
- вольтметр ***PV1*** напруги U_a фази ***a*** обмотки вищої напруги – первинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- амперметр ***PA1*** струму I_A фази ***A*** обмотки вищої напруги;
- вольтметр ***PV2*** напруги U_a фази ***a*** обмотки нижчої напруги – вторинної обмотки трансформатора ***TV1***;
- амперметр ***PA2*** струму I_a фази ***a*** обмотки вищої напруги;
- вольтметр ***PV3*** напруги $U_н$ навантаження випрямляча;
- амперметр ***PA3*** струму $I_н$ навантаження випрямляча.

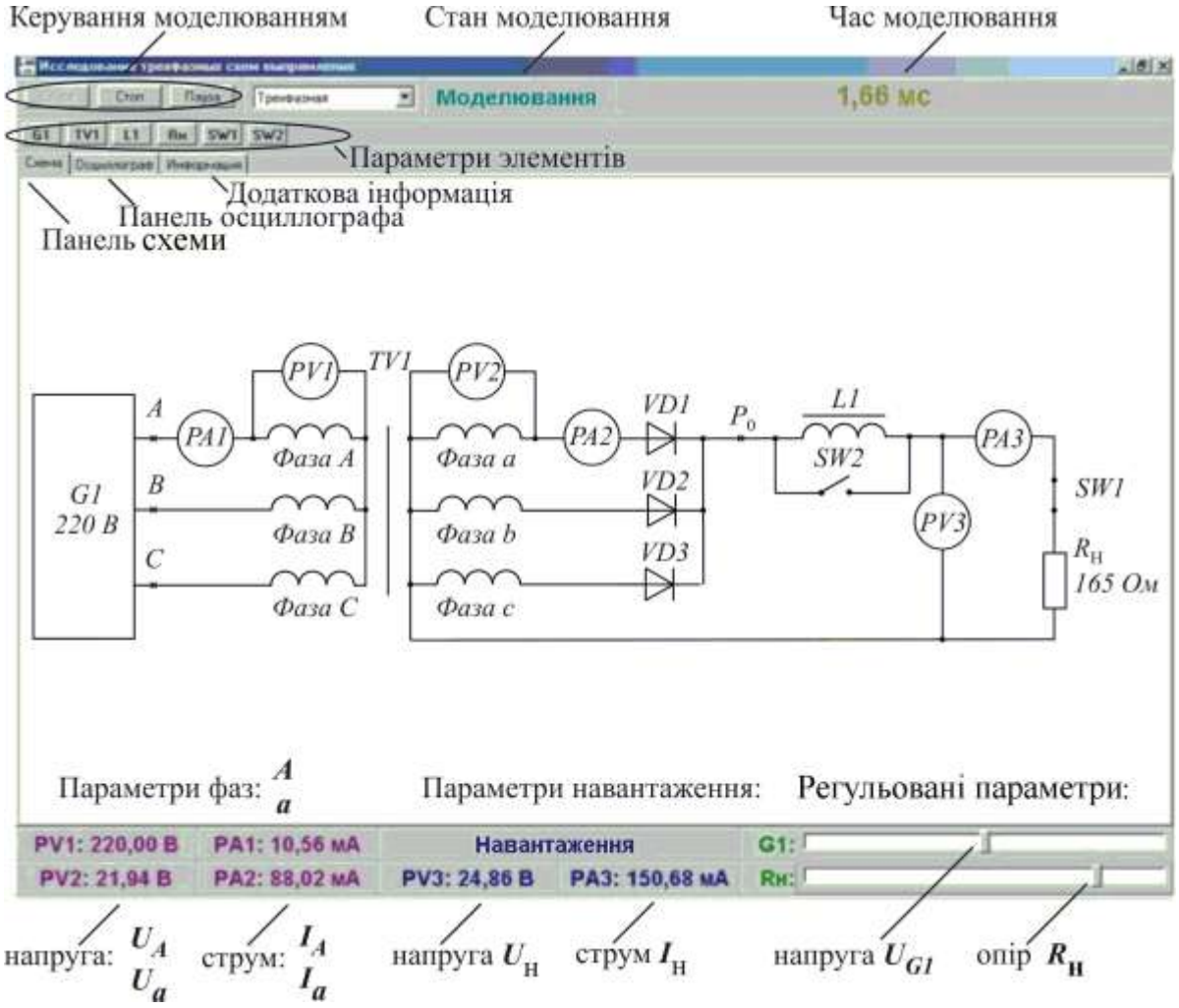


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваних схем**

k	**Позначення в макеті**	**Опис**	**№ рис.**
1	Трифазна	Трифазна однопівперіодна схема (схема Міткевича). Елементи ***VD4…VD6*** не використовуються	3.2
2	Трифазна мостова	Трифазна двопівперіодна схема (схема Ларіонова)	3.3

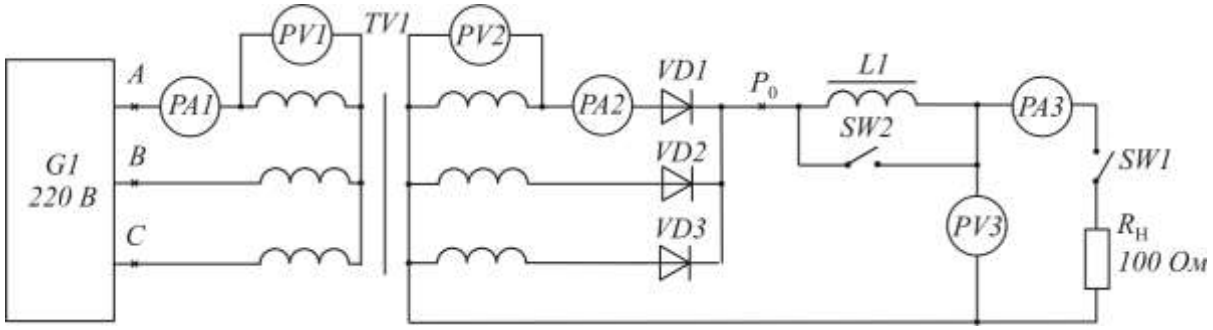


Рисунок 3.2 – Трифазна схема випрямлення (***k* = 1)**

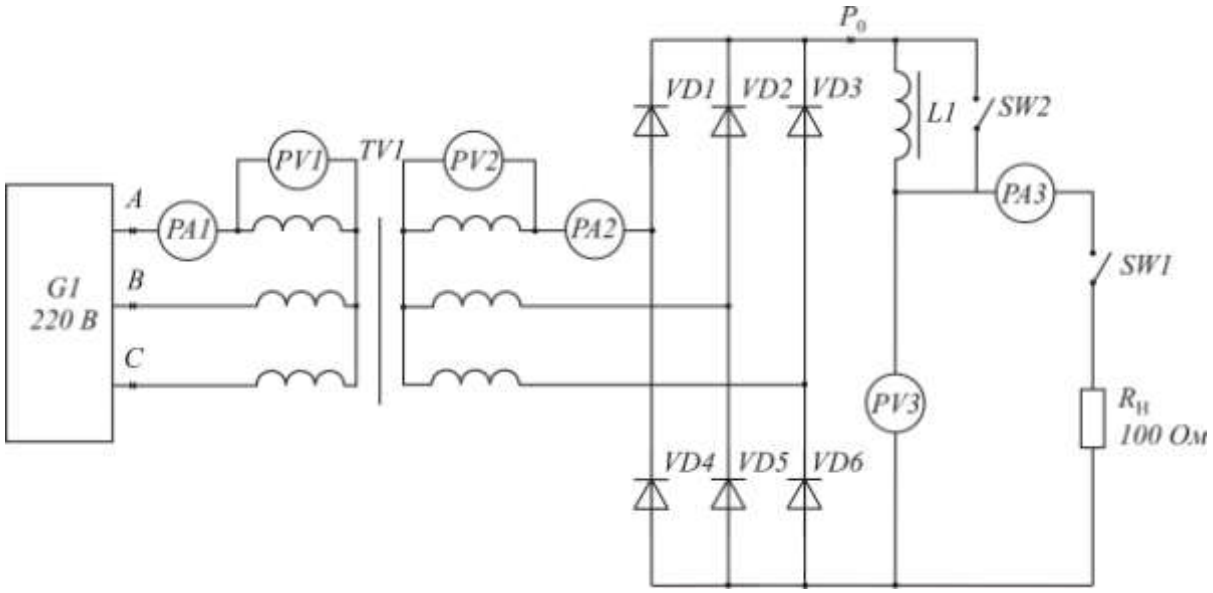


Рисунок 3.3 – Трифазна мостова схема випрямлення (***k* = 2)**

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1***, трансформатора ***TV1***, який забезпечує узгодження напруги джерела первинного електроживлення з потрібною напругою навантаження, випрямного блока ***VD1***…***VD3*** чи ***VD1***…***VD6*** (залежно від схеми), згладжувального фільтра ***L1*** та опору навантаження $\boldsymbol{R_н}$, який може підмикатися за допомогою вимикача ***SW1***. Список елементів макета подано у табл. 3.2. На

панель оперативних регулювань виведено вихідну напругу генератора ***G1*** та опір резистора навантаження $R_н$.

Діючі значення напруги та струму первинної U_A, I_A фази ***A*** та вторинної U_a, I_a обмоток фази ***a*** трансформатора ***TV1*** контролюються відповідно вольтметрами ***PV1, PV2*** й амперметрами ***PA1, PA2***. Середні значення напруги $U_н = U_0$ і струму $I_н = I_0$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV3*** й амперметром ***PA3***.

Таблиця 3.2 - **Склад лабораторного макета**

Позиція	**Тип елемента**	**Регульовані параметри**				**Примітка**
		параметр	**мін**	**макс**	**од. вим.**	
G1	Трифазний генератор	вихідна напруга	198	242	В	Діюче значення, оперативне регулювання
		частота	50	400	Гц	
TV1	Трифазний трансформатор	коефіцієнт трансформації	5	15		
		опір вторинної обмотки	0,1	1,5	Ом	Активний опір
		індуктивність розсіювання	0,1	1	мГн	
VD1	Діод					
VD2	Діод					
VD3	Діод					
VD4	Діод					Тільки для схеми 2
VD5	Діод					Тільки для схеми 2
VD6	Діод					Тільки для схеми 2
L1	Дросель	Індуктивність	0,01	10	Гн	
$R_н$	Резистор	Опір	5	200	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Діюче значення
PV2	Вольтметр					Діюче значення
PA1	Амперметр					Діюче значення
PA2	Амперметр					Діюче значення
PV3	Вольтметр					Середнє значення
PA3	Амперметр					Середнє значення
P_0	Контрольна точка					

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг і струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа відбувається автоматично, відповідно до роботи генератора ***G1***. Тому тривалість розгортання проградуйовано в частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	**Осцилограми електричних процесів**
TV1, U1	Напруга $u_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, I1	Струм $i_1(t)$ первинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, U2	Напруга $u_2(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1***
TV1, I2	Струм $i_2(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1***
VD1, U	Напруга $u_{VD1}(t)$ на діоді ***VD1***
VD1, I	Струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
VD2, U	Напруга $u_{VD2}(t)$ на діоді ***VD2***
VD2, I	Струм $i_{VD2}(t)$ діода ***VD2***
VD3, U	Напруга $u_{VD3}(t)$ на діоді ***VD3***
VD3, I	Струм $i_{VD3}(t)$ діода ***VD3***
VD4, U	Напруга $u_{VD4}(t)$ на діоді ***VD4***
VD4, I	Струм $i_{VD4}(t)$ діода ***VD4***
$R_н$, ***U***	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$
$R_н$, ***I***	Струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$
P_0, ***U***	Напруга $u_в(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ***
P_0, ***I***	Вихідний струм $i_в(t)$ блока випрямляння ***БВ***
C1, U	Напруга $u_{C1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{C1}(t)$ конденсатора ***C1***
C2, U	Напруга $u_{C2}(t)$ на конденсаторі ***C2***
C2, I	Струм $i_{C2}(t)$ конденсатора ***C2***
L1, U	Напруга $u_{L1}(t)$ на дроселі ***L1***
L1, I	Струм $i_{L1}(t)$ дроселя ***L1***

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичним вказівкам до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови випрямних пристроїв;
- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів випрямних пристроїв;

- процеси функціонування у випрямних пристроях;
- особливості лабораторного макета;
- процеси функціонування досліджуваних багатофазних схем випрямляння за різних режимів роботи.

4.2 Підготувати бланки звіту, де подати інформацію, потрібну, на думку студента, надалі для виконання лабораторної роботи.

4.3 Усвідомити призначення кожного елемента схем випрямляння, мета кожного досліду, сподівані результати.

4.4 Відповісти на контрольні запитання

5 Контрольні запитання

5.1 Чому в багатофазних схемах випрямляння найбільш оптимальним є індуктивний характер навантаження?

5.2 Які форми мають струми у вторинних та первинних обмотках трансформатора трифазної однотактної схеми випрямляння, яка має навантаження індуктивного характеру?

5.3 Те саме що й у п. 5.2, для двотактної мостової схеми випрямляння.

5.4 У який спосіб впливає індуктивність розсіювання трансформатора на форму струмів у фазах вторинних обмоток та форму вихідної напруги? Поясніть на прикладі трифазної однотактної схеми випрямляння, яка має навантаження індуктивного характеру.

5.5 Яка є форма випрямленої напруги на навантаженні шестифазної мостової схеми випрямляння?

5.6 Наведіть пояснення до графіків зовнішніх характеристик багатофазних схем випрямляння.

5.7 У який спосіб визначається к. к. д. для досліджуваних схем випрямляння й чи можна його визначити дослідним шляхом, використовуючи лабораторну установку?

5.8 У який спосіб визначається коефіцієнт використовування за потужністю первинної, вторинної обмотки, а також усього трансформатора в кожній зі схем випрямляння за навантаження індуктивного характеру?

5.9 За яких параметрів обираються діоди для багатофазних схем випрямляння?

5.10 Наведіть порівняльну оцінку щодо основних параметрів і показників якості, досліджуваних схем випрямляння.

5.11 Покажіть, як протікає постійна складова струму навантаження для кожної з наведених на рис. 3.2 та 3.3 схем.

5.12 Які недоліки й переваги має кожна з досліджуваних схем?

5.13 Що таке кут перекриття фаз?

5.14 Від яких параметрів залежить кут перекриття фаз?

5.15 В який спосіб слід визначати величину зворотної напруги на діодах випрямляча?

5.16 Що таке зовнішня характеристика випрямляча?

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови трифазних випрямних пристроїв, а також особливості процесів їхнього функціонування. Ознайомитись з описом лабораторного макета, поданого в розд. 3.

6.2 Дослідити багатофазні схеми випрямлячів двох типів (трифазну однотактну (***k* = 1**) та трифазну мостову (***k* = 2**) за активного та індуктивного характеру навантаження.

6.2.1 Дослідити зовнішні (навантажувальні) характеристики випрямлячів.

6.2.2 Визначити вихідні опори випрямлячів.

6.2.3 Визначити відсоткові зниження вихідних напруг випрямлячів.

6.2.4 Визначити коефіцієнти використовування за потужністю обмоток трансформатора ***TV1***.

6.2.5 Дослідити процеси функціонування випрямлячів за активного та індуктивного характеру навантаження:

- пульсації у вихідному колі блока випрямляння ***БВ*** й у колі навантаження випрямляча;
- процеси комутації (перекриття фаз);
- електричні процеси (струми та напруги) в елементах і колах випрямляча.

6.3 Опрацювати дослідні дані. Сформулювати висновки за результатами лабораторної роботи.

7 Методика виконання лабораторної роботи

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови трифазних схем випрямляння й особливості процесів їхнього функціонування за матеріалами даної лабораторної роботи та рекомендованою літературою [2.1...2.5].

Вивчити особливості схемотехнічного виконання й функціонування лабораторного макета (див. розд. 3). Одержати у викладача контрольні запитання щодо вивченого матеріалу і підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму та обсяг їхнього подання у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування лабораторної роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для виконання роботи є з'ясування особливостей функціонування лабораторного макета.

*7.2 До пункту 6.2. Дослідження багатофазних схем випрямляння двох типів (трифазної однотактної (**k = 1**) та трифазної мостової (**k = 2**) за активного й індуктивного характеру навантаження.*

Забезпечення необхідної схеми дослідження, – трифазної однотактної (***k* = 1** – рис. 3.2) і трифазної мостової (***k* = 2** – рис. 3.3) – здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для забезпечення необхідних параметрів елементів схеми та режимів роботи досліджуваного випрямляча може бути використано кнопки швидкого доступу ***"G1", "TV1", "L1", "$R_н$", "SW1", "SW2"*** (рис. 3.1).

7.2.1 До пункту 6.2.1 Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик випрямлячів.

Зовнішня характеристика схеми випрямляння являє собою залежність $U_н = f(I_н)$ вихідної напруги випрямляча $U_н$ від струму $I_н$ за $U_1 = U_м = U_{G1\ ном} = \mathbf{const}$ ($U_A = U_B = U_C = U_{G1\ ном} = \mathbf{const}$).

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму навантаження 5...7 його значень, які рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $R_н$, I_a, U_a, $U_н$, $U_1 = U_{G1}$, $I_1 = I_{G1}$. Задані значення занести до таблиці 7.1 (***k***), де ***k*** – тип схеми випрямляча.

Таблиця 7.1 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні данні							Розрахункові дані							
	$R_н$ Ом	$I_н$, А	$U_н$, В	U_a, В	U_1, В	I_1, А	I_a, А	$\Delta U_н$, В	$\Delta I_н$ А	S_1, ВА	r_b, Ом	S_2, ВА	$P_н$, Вт	K_1	K_2
1 2 …															

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати тип схеми випрямляча – **"Трифазна однотактна" (*k* = 1),** або **"Трифазна мостова" (*k* = 2)**;
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (фазна напруга $U_A = U_B = U_C = U_{G1\ ном}$, робоча частота $f_м = f_{м\ ном}$), використовуючи кнопку "***G1***" на панелі елементів (див. рис. 3.1) задля появи вікна редагування;

- відредагувати параметри трансформатора ***TV1***: установити потрібний коефіцієнт трансформації n_{12} та активний опір $r_2 = r_{2\ ном}$ вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** фази ***a*** (r_a), фази ***b*** (r_b), фази ***c*** (r_c) ($r_a = r_b = r_c = r_{2\ ном}$);
- відредагувати параметри дроселя ***L1:*** установити номінальне значення індуктивності дроселя $L1 = L1_{ном}$;
- використовуючи вимикач ***SW2*** (див. рис. 3.1), забезпечити потрібний характер навантаження: за активного характеру навантаження вимикач ***SW2*** переводиться до замкненого провідного стану, за індуктивного характеру – до розімкненого непровідного стану;
- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"**;
- зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2*** та ***PV3*** відповідно напруг U_A, U_a первинної та вторинної обмоток трансформатора ***TV1*** фаз ***A*** та ***a*** й $U_{н\ нс}$ – напруги ненавантаженого стану на виході випрямляча. Результат занести до таблиці 7.1 (***k***);
- підімкнути опір $R_н$ навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- змінюючи опір $R_н$ навантаження (використовуючи повзунок "$R_н$" – див. рис. 3.1, правий нижній кут) від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад, $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2*** та ***PV3*** відповідно напруг U_A та U_a фаз ***A*** та ***a*** трансформатора ***TV1*** та $U_н$ – напруги в колі навантаження випрямляча, амперметрів ***PA1, PA2*** та ***PA3*** відповідно струмів I_A та I_a, споживаних від фаз ***A*** та ***a***, і струму $I_н$ у колі навантаження випрямляча. Результати вимірювань занести до таблиці 7.1 (***k***), де відбити й значення $I_1 = I_{G1}$, $U_1 = U_{G1\ ном}$;
- за результатами дослідження побудувати зовнішні характеристики.

7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначання вихідних опорів випрямлячів.

Вихідний опір випрямляча визначається на підставі здобутих результатів вимірювань п. 7.2. 1 (див. табл. 7.1 (***k***)) за формулою

$$r_b = \Delta U_н / \Delta I_н ,$$

де $U_н = U_{н\ max} - U_н$; $I_н = I_{н\ max} - I_н$; $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження (див. табл. 7.1 (***k***)).

7.2.3 Визначення відсоткових знижень вихідних напруг випрямлячів.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги випрямляча при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\,нс} - U_{н\,ном}}{U_{н\,нс}} \cdot 100\% .$$

*7.2.4 Визначення коефіцієнта використовування за потужністю обмоток трансформатора **TV1**.*

Коефіцієнт використовування за потужністю трансформатора $K_{тр}$ та його первинних K_1 і вторинних K_2 обмоток у схемах випрямляча визначається у вигляді

$$K_{тр} = P_н / S_{тр}; \qquad K_1 = P_н / S_1; \qquad K_2 = P_н / S_2;$$

$$S_1 = 3U_1I_1; \qquad S_2 = 3U_aI_a; \qquad S_{тр} = (S_1+S_2)/2; \quad P_н = I_нU_н,$$

де $P_н$ – активна потужність у колі навантаження випрямляча;

$S_{тр}$, S_1, S_2 – габаритні потужності відповідно трансформатора ***TV1*** і його первинних та вторинних обмоток.

Для визначення коефіцієнта використовування за потужністю первинної й вторинної обмоток, а також усього трансформатора в кожній зі схем випрямляння за навантаження активного й індуктивного характеру треба встановити номінальну величину струму $I_{н\,ном}$ навантаження, виміряти покази приладів ***PA1, PA2*** й ***PA3, PV1, PV2*** й ***PV3*** і дані занести до таблиці 7.2.

7.2.5 До пункту 6.2.5. Дослідження процесів функціонування трифазних схем випрямлячів.

Для дослідження процесів функціонування в схемах випрямляння необхідно, використовуючи перемикач вибору схеми дослідження, обрати (див. рис. 3.1) потрібну схему (з активним чи індуктивним характером навантаження).

*Дослідження пульсацій у вихідних колах блока випрямляння **БВ** та навантаження випрямляча*

Для вимірювання параметрів змінних складових на виході блока випрямляння ***БВ*** частоти $f_{ви}$ та розмаху $\Delta U_{в\sim}$ напруги $u_0(t)$ і розмаху $\Delta I_{в\sim}$ струму $i_0(t)$ слід підімкнути (див. рис. В.13 підрозд. В.1) осцилограф до контрольних точок (див. табл. 3.2): у першому випадку до "P_0,U" – напруга $u_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ***, а в другому – до ***"P_0, I"*** – струм $i_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ***.

Для вимірювання параметрів змінних складових у колі навантаження випрямляча частоти $f_{н\,и}$ і розмаху $\Delta U_{н\sim}$ напруги $u_н(t)$ і розмаху $\Delta I_{н\sim}$ струму $i_н(t)$ треба підімкнути осцилограф (див. рис. В.13 підрозд. В.1) до контрольних точок: у першому випадку – до ***"$R_н$, U"*** – напруга $u_н(t)$ навантаження $R_н$ випрямляча (див. табл. 3.2), а в другому – ***"$R_н$, I"*** – струм $i_н(t)$ у колі навантаження $R_н$ випрямляча.

Експериментальні значення частот $f_{ви}$ й $f_{ни}$ досліджуваних процесів визначаються за осцилограмами відповідно $u_0(t)$ і $u_н(t)$. Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду T спостережуваної кри-

вої, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал T визначається добутком двох величин $T = nl$: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю у поділках і значення величини n часу на поділку у даному положенні перемикача **"Час/ Поділка"** У цьому разі

$$f = 1/T = 1/nl.$$

Таблиця 7.2 – **Результати досліджень**

Параметри (вимірювані чи обчислювані)	**Трифазна однотактна схема**		**Трифазна мостова схема**	
	активне навантаження	**індуктивне навантаження**	**активне навантаження**	**індуктивне навантаження**
$I_н$, **А**				
$U_н$, **В**				
$I_1 = I_G$, **А**				
$U_1 = U_{G1}$, **В**				
$I_2 = I_a$, **А**				
$U_2 = U_a$, **В**				
$P_н = U_н I_н$, **Вт**				
$S_1 = 3 U_1 I_1$, **ВА**				
$S_2 = 3 U_2 I_2$, **ВА**				
$S_{тр} = (S_1+S_2)/2$, **ВА**				
$K_1 = P_н / S_1$				
$K_2 = P_н / S_2$				
$K_{тр} = P_н / S_{тр}$				

При вимірюванні параметрів змінних складових ($f_{ви}$, $\Delta U_{в\sim}$, $\Delta I_{в\sim}$, $f_{ни}$, $\Delta U_{н\sim}$, $\Delta I_{н\sim}$) осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової ПС вимкнено – рис. В.13 підрозд. В.1) підсилювача вертикального посилення.

Методика дослідження фільтрувальних властивостей згладжувальних фільтрів припускає виконання таких кроків (результати вимірювань занести до таблиці 7.3 (k)):

- обрати перемикачем вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) потрібну схему дослідження випрямляча – "**Трифазна однотактна**" (k = 1 – рис. 3.2), "**Трифазна мостова**" (k = 2 – рис. 3.3);
- відредагувати параметри трансформатора ***TV1*** – значення коефіцієнта n_{12} трансформації трансформатора $n_{12} = n_{12\ ном}$ (див. рис. 3.1 – кнопку "***TV1***");

- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напругу $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, потрібну частоту $f_м = f_{м\ ном}$), використовуючи кнопку "***G1***" на панелі елементів (див. рис. 3.1) появи вікна редагування;
- відредагувати параметри елемента ***L1*** згладжувального фільтра випрямляча, використовуючи кнопку відповідно "***L1***" на панелі елементів (див. рис. 3.1)**,** установити номінальне значення $L1_{ном}$**;**
- використовуючи вимикач ***SW2*** (див. рис. 3.1), забезпечити потрібний характер навантаження: за активного характеру навантаження вимикач ***SW2*** переводиться до замкненого провідного стану, за індуктивного характеру – до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"** – рис. 3.1;
- установити опір $R_н = R_{ном}$ у колі навантаження випрямляча, використовуючи орган регулювання – повзунок "$R_н$" (див. рис. 3.1), що забезпечує значення струму $I_н = I_{н\ ном}$**;**
- зняти покази вольтметра ***PV3*** й амперметри ***PA3***. Результати вимірювань $U_н$ й $I_{н\ ном}$ занести до таблиці 7.3 (***k***);
- виміряти розмах $\Delta U_{в\sim}$ і частоту $f_{ви}$ пульсації напруги на виході блока випрямляння ***БВ*** за осцилограмою напруги $u_0(t)$ (контрольна точка P_0, ***U*** відповідно до табл. 3.2);
- виміряти розмах $\Delta I_{в\sim}$ пульсації струму на виході блока випрямляння ***БВ*** за осцилограмою $i_0(t)$ (контрольна точка P_0, ***I***);
- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження випрямляча за осцилограмою напруги $u_н(t)$ (контрольна точка $R_н$, ***U*** відповідно до табл. 3.2);
- виміряти розмах $\Delta I_{н\sim}$ пульсації струму в колі навантаження випрямляча за осцилограмою $i_н(t)$ ($R_н$, ***I*** – табл. 3.2);
- виконати аналогічні вимірювання за струмів $I_н$ навантаження, $0{,}75I_{н\ ном}$, $0{,}5I_{н\ ном}$ та $0{,}25I_{н\ ном}$, використовуючи орган регулювання – повзунок "$R_н$" – див. рис. 3.1 (результати досліджень занести до табл. 7.3 (***k***));
- дослідження з даної методики виконати для двох варіантів навантаження випрямляча: за активного й індуктивного характеру навантаження;
- для індуктивного характеру навантаження виконати аналогічні вимірювання за різних значень індуктивності дроселя ***L1*** – результати досліджень занести до таблиці 7.4 **(*k*)**;
- використовуючи результати експерименту (табл. 7.3 **(*k*)** та 7.4 **(*k*)**), розрахувати й заповнити розрахункову частину таб-

лиць 7.3 **(*k*)** та 7.4 **(*k*)** з урахуванням наведених далі співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначити нормовані частоти:

$$\overline{f}_{ви} = f_{ви} / f_{м}; \quad \overline{f}_{ни} = f_{ни} / f_{м}.$$

Коефіцієнти пульсацій на виході блока випрямляння ***БВ*** (струму $K_{пв}$ та напруги $K_{пвU}$), у колі навантаження (струму $K_{пн}$ та напруги $K_{пнU}$) випрямляча визначають за формулами:

$$K_{пв} = \frac{\Delta I_{в\sim}}{2I_{н}}; \qquad K_{пн} = \frac{\Delta I_{н\sim}}{2I_{н}},$$

$$K_{пвU} = \frac{\Delta U_{в\sim}}{2U_{н}}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_{н}}.$$

Коефіцієнти згладжування за струмом S_i та напругою S_U визначаються з урахуванням коефіцієнтів пульсації:

$$S_i = K_{пв} / K_{пн}, \quad S_U = K_{пвU} / K_{пнU}.$$

Результати розрахунків $\overline{f}_{ви}$, $\overline{f}_{ни}$, $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, S_U відбити в таблицях 7.3 (***k***) та 7.4 **(*k*).**

За результатами досліджень побудувати робочі характеристики $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, $S_U = f\,(I_н, C1, L1)$.

Таблиця 7.3 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина								Розрахункові дані							
	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1																
2																
…																

Таблиця 7.4 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина									Розрахункові дані							
	$L1$, мГн	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1 2 …																	

Дослідження процесів комутації (перекриття) фаз

Однією з основних характеристик випрямлячів з кількістю фаз вторинних обмоток дві й більше є кут γ комутації (перекриття) фаз.

Кут γ перекриття фаз визначається за допомогою осцилографа. Задля визначення кута перекриття фаз слід виконати таке:

- розпочати моделювання;
- установити номінальний струм $I_{н\ ном}$ навантаження;
- підімкнути осцилограф на вихід блока випрямляння ***БВ*** (контрольна точка P_0, U – див. табл. 3.2);
- обчислити величину кута перекриття фаз за допомогою формули

$$\gamma = \frac{a_u b}{a+b} = \frac{360 \cdot b}{m \cdot (a+b)}$$

де a_u, a – тривалості інтервалів роботи окремо взятої фази відповідно ідеального (за $L_b = 0$: $a_u = 360$ град/m) і реального (при $L_b \neq 0$) випрямляча; b – тривалість інтервалу одночасної роботи двох фаз.

Значення a й b у формулу слід підставляти в міліметрах чи то в числах клітин вимірювальної сітки осцилографа (рис. 7.1).

Дослідження електричних процесів трифазних схем випрямляння

За допомогою осцилографа макета спостерігати осцилограми напруг та струмів відповідно до прийнятих позначень (див. табл. 3.2):

- напруга $u_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- струм $i_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- напруга $u_0(t)$ і струм $i_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ*** (контрольна точка P_0);
- напруга $u_н(t)$ на опорі $R_н(t)$ навантаження;
- напруга $u_{кa}(t)$ на виході пристрою керування ***ПК*** фази ***a*** і т. д.

Діаграми слід зобразити в одному масштабі по горизонталі

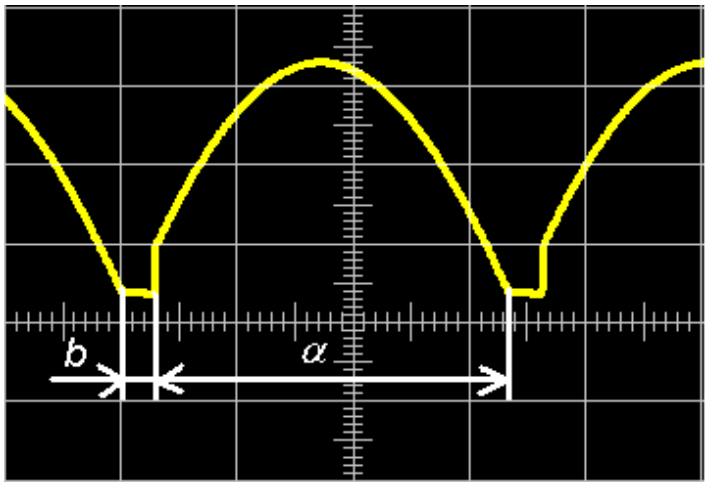


Рисунок 7.1 – Визначення кута перекриття фаз

7.3. До пункту 6.3. Висновки за результатами досліджень схем випрямляння.

Користуючись даними щодо дослідів таблиць 7.3 й 7.4, розрахувати, побудувати й виконати аналіз:

- зовнішніх характеристик досліджуваних схем випрямляння;
- коефіцієнтів використовування за потужністю первинної, вторинної обмоток і трансформатора в цілому за навантажень активного й індуктивного характеру;
- процесів функціонування випрямлячів.

За здобутими результатами дослідження багатофазних схем випрямляння треба сформулювати висновки. У цих висновках слід відбити особливості процесів функціонування кожної схеми, результати аналізу схем випрямляння за основними показниками, здобутими експериментально. Висновки не повинні повторювати змісту роботи.

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципову електричну, функціональну й структурну схеми трифазних випрямних пристроїв;

8.2 результати досліджень відповідно до пп. 6.1...6.3:

- таблиці з результатами вимірювань та розрахунків;
- графіки робочих характеристик

$$U_н,\ r_в,\ K_2 = f(I_н);$$

$$\overline{f}_{вц},\ \overline{f}_{нц},\ K_{пв},\ K_{пн},\ K_{пв\underline{U}},\ K_{пн\underline{U}},\ S_i,\ S_U = f\ (I_н,\ L1);$$

- осцилограми струмів та напруг в основних колах схем випрямляння за навантаження активного й індуктивного характеру;

8.3 Висновки й порівняльну оцінку здобутих результатів.

Лабораторна робота № 1.3
Дослідження однотактних керованих і некерованих випрямлячів

1 Мета роботи

Дослідження принципів побудови й функціонування керованих і некерованих випрямних пристроїв та особливостей їхньої схемотехнічної реалізації.

Вивчення принципів побудови й функціонування керованих і некерованих однотактних однофазних та трифазних випрямних пристроїв. Експериментальне дослідження їхніх основних характеристик та електромагнітних процесів.

Освоєння методики експериментального визначання основних характеристик керованих випрямлячів.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С. 69 – 127.

2.2 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А.Бокуняев и др.; Под ред. В.Е.Китаева – М.: Радио и связь, 1988. – С. 87–128.

2.3 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / О.А. Доморацкий и др.; – М.: Радио и связь, 1981. – С. 79–138.

2.4 Китаев В.Е. и др.; Электропитание устройств связи: – М.: Связь, 1975. – С. 113–176.

2.5 Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 65–143.

3 Опис лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження керованих однофазних та трифазних тиристорних випрямлячів – однофазного однотактного за активного (***k* = 1)** та індуктивного (***k* = 2)** (з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характеру навантаження й трифазного однотактного за активного (***k* = 3**) та індуктивного (***k* = 4)** (з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характеру навантаження.

Короткий опис досліджуваних схем наведено в табл. 3.1.

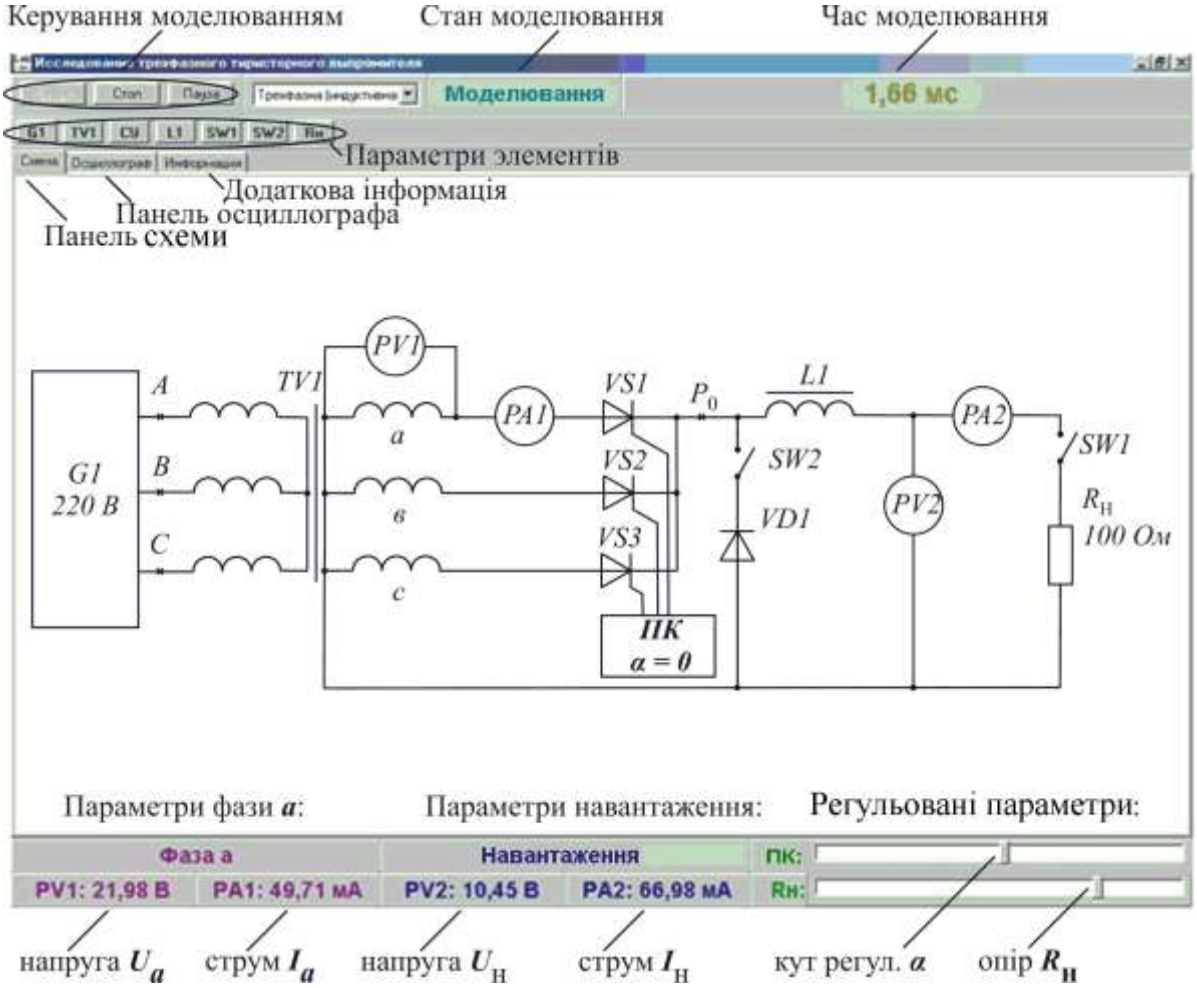


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Таблиця 3.1 – Опис досліджуваних схем

k	**Позначення в макеті**	**Опис**	***№ рис.***
1	Однофазна (активне навантаження – ***k* = 1**)	Однофазний тиристорний випрямляч, що працює на активне навантаження	*3.2, а*
2	Однофазна (індуктивне навантаження – ***k* = 2**)	Однофазний тиристорний випрямляч, що працює на індуктивне навантаження. Є можливість роботи із замикаючим діодом (VD1)	*3.2, б*
3	Трифазна (активне навантаження – ***k* = 3**)	Трифазний тиристорний випрямляч, що працює тільки на активне навантаження	*3.3, а*
4	Трифазна (індуктивне навантаження – ***k* = 4**)	Трифазний тиристорний випрямляч, що працює на індуктивне навантаження. Є можливість роботи із замикаючим діодом (***VD1***)	*3.3, б*

а)

б)

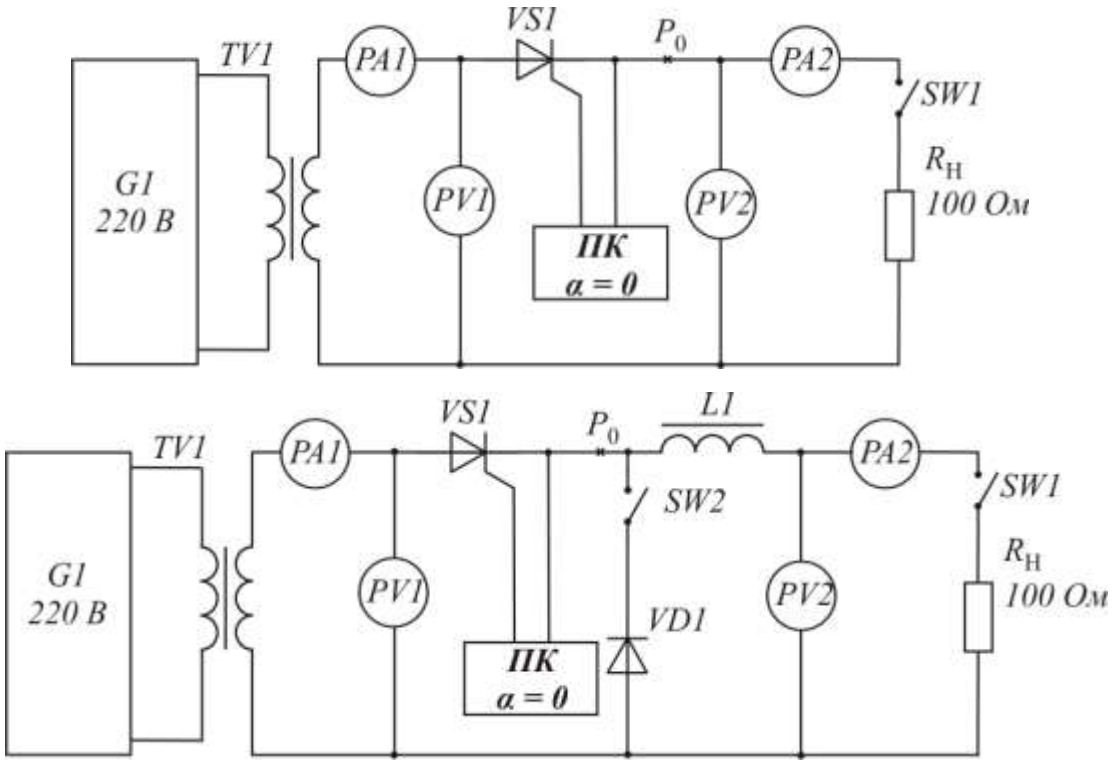


Рисунок 3.2 – Однофазна схема з активним (**k = 1)** (*а*), індуктивним (**k = 2**) (*б*) навантаженням

а)

б)

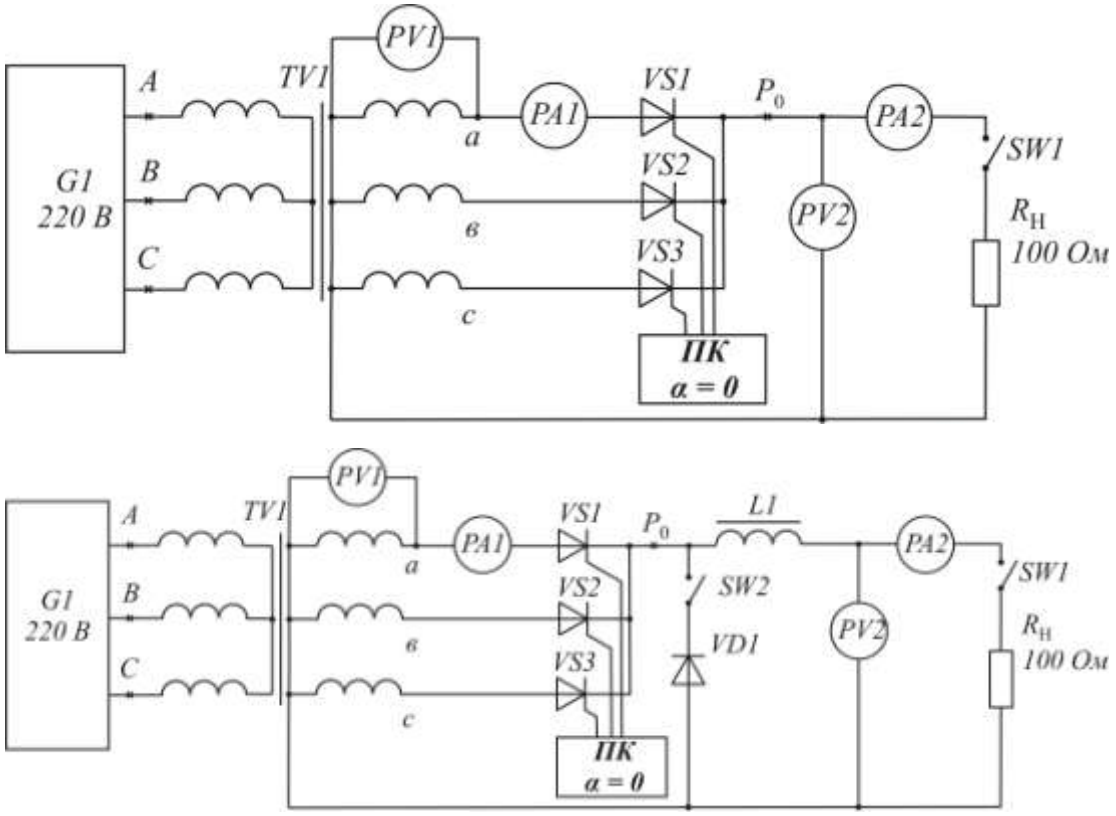


Рисунок 3.3 – Трифазна схема з активним (**k** = 3) (*а*), індуктивним (**k** = 4) (*б*) навантаженням

Лабораторний макет містить:

- джерело ***G1*** трифазної синусоїдної напруги;
- трифазний трансформатор ***TV1***;
- трифазний блок випрямляння ***БВ***, утворений тиристорами ***VS1…VS3***;
- згладжувальний фільтр, утворений дроселем ***L1***;
- додатковий діод ***VD1***;
- опір навантаження $\boldsymbol{R_н}$;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** напруги $\boldsymbol{U_a}$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- амперметр ***PA1*** струму $\boldsymbol{I_a}$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- вольтметр ***PV2*** напруги $\boldsymbol{U_н}$ у колі навантаження випрямляча;
- амперметр ***PA2*** струму $\boldsymbol{I_н}$ навантаження;
- пристрій керування ***ПК*** тиристорним випрямлячем.

Лабораторний макет складається із джерела первинного електроживлення ***G1***, трансформатора ***TV1***, що забезпечує узгодження напруги джерела первинного електроживлення з потрібною напругою навантаження, тиристорного випрямного блока ***VS1…VS3*** (або лише ***VS1***, залежно від схеми), згладжувального фільтра ***L1*** (чи без нього, залежно від досліджуваної схеми), замикаючого діода ***VD1*** й опору навантаження $\boldsymbol{R_н}$. Опір навантаження $\boldsymbol{R_н}$ і замикаючий діод ***VD1*** можуть вимикатися за допомогою вимикачів ***SW1*** та ***SW2***.

Випрямний блок керується пристроєм керування ***ПК***. Пристрій керування продукує імпульси, необхідні для відкривання тиристорів, з урахуванням специфіки роботи керованих випрямлячів. Список елементів макета подано у табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено кут регулювання $\boldsymbol{\alpha}$ пристроя керування ***ПК*** та опір резистора навантаження $\boldsymbol{R_н}$.

Діючі значення напруги та струму вторинної обмотки фази ***a*** трансформатора ***TV1*** контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги $\boldsymbol{U_н = U_0}$ та струму $\boldsymbol{I_н = I_0}$ навантаження $\boldsymbol{R_н}$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг і струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа відбувається автоматично відповідно до роботи генератора ***G1***. Тому тривалість розгортки проградуйовано у частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.2 - **Склад лабораторного макета**

Позиція	**Тип елемента**	**Регульовані параметри**				**Примітка**
		параметр	**мін**	**макс**	**од. вим.**	
G1	Трифазний генератор	фазна напруга	198	242	В	Діюче значення,
		частота	50	400	Гц	
TV1	Трифазний трансформатор	коефіцієнт трансформації	5	15		
		опір обмотки	0,1	1,5	Ом	Активний опір
VS1	Тиристор					
VS2	Тиристор					Для схем ***k*** = 3 і 4
VS3	Тиристор					Для схем ***k*** = 3 і 4
VD1	Діод					Для схем ***k*** = 3 і 4
L1	Дросель	Індуктивність	0,01	10	Гн	Для схем ***k*** = 3 і 4
$R_н$	Резистор	Опір	5	200	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
SW2	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач блокувального діода. Тільки для схем ***k*** = 3 і 4
PV1	Вольтметр					Діюче значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Діючезначення
PA2	Амперметр					Середнє значення
P_0	Контрольна точка					
ПК		кут регулювання (α)	0	180		Для однофазних схем
			0	150		Для трифазних схем
		вихід ***a***	Вимк.	Вмк.		
		вихід ***b***	Вимк.	Вмк.		
		вихід ***c***	Вимк.	Вмк.		

4 Домашнє завдання.

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] і методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	**Осцилограми електричних процесів**
ПК*, Вихід *a	Напруга $u_{ка}(t)$ на виході пристрою керування фази ***a***
ПК*, Вихід *b	Напруга $u_{кb}(t)$ на виході пристрою керування фази ***b***
ПК*, Вихід *c	Напруга $u_{кс}(t)$ на виході пристрою керування фази ***c***
***TV1*, U_a**	Напруга $u_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***
***TV1*, I_a**	Струм $i_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***
***TV1*, U_b**	Напруга $u_b(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***b***
***TV1*, I_b**	Струм $i_b(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***b***
***TV1*, U_c**	Напруга $u_c(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***c***
***TV1*, I_c**	Струм $i_c(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***c***
***VS1*, $U_{ка}$**	Напруга $u_{VS1}(t)$ поміж катодом та анодом тиристора ***VS1***
***VS1*, I_a**	Струм $i_{VS1}(t)$ анода тиристора ***VS1***
***VS2*, $U_{ка}$**	Напруга $u_{VS2}(t)$ поміж катодом та анодом тиристора ***VS2***
***VS2*, I_a**	Струм $i_{VS2}(t)$ анода тиристора ***VS2***
***VS3*, $U_{ка}$**	Напруга $u_{VS3}(t)$ поміж катодом та анодом тиристора ***VS3***
***VS3*, I_a**	Струм $i_{VS3}(t)$ анода тиристора ***VS3***
VD1*, *U	Напруга $u_{VD1}(t)$ на діоді ***VD1***
VD1*, *I	Струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
P*$_0$, *U	Напруга $u_0(t)$ на виході блока випрямляння **БВ**
P*$_0$, *I	Струм $i_0(t)$ на виході блока випрямляння **БВ**
L1*, *U	Напруга $u_1(t)$ на дроселі ***L1***
L1*, *I	Струм $i_1(t)$ дроселя ***L1***
R*$_н$, *U	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$
R*$_н$, *I	Струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$

- особливості структурної й функціональної побудови регульованих і нерегульованих випрямних пристроїв;
- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів пристроїв випрямляння;
- процеси функціонування схеми тиристорного керованого випрямляння, діаграми напруг та струмів її елементів;
- особливості лабораторного макета.

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, у подальшому для виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента схеми випрямляння, мету кожного досліду, сподівані криві й результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

4.6 Вивчити особливості електричних процесів, які протікають у різних частинах схеми керованого випрямляча.

5 Контрольні запитання

5.1 Принципи функціонування й основні характеристики некерованого вентиля – діода й керованого вентиля – тиристора.

5.2 Який є принцип регулювання вихідної напруги тиристорного випрямляча?

5.3 Що таке кут регулювання? Дайте пояснення сімейству регулювальних характеристик керованого тиристорного випрямляча.

5.4 У який спосіб впливає характер навантаження схеми випрямляча на величину й форму вихідної напруги керованого й некерованого випрямлячів.

5.5 Дайте пояснення сімейству зовнішніх характеристик керованого й некерованого випрямлячів.

5.6 У чому полягають достоїнства й недоліки некерованих і керованих тиристорних випрямлячів?

5.7 У чому полягають відмінності електричних процесів в елементах і колах схем регульованого випрямляча за активного навантаження й навантаження з індуктивною реакцією для різних значень кута регулювання?

5.8 Чому дорівнює максимальний кут регулювання α_{max} за активного навантаження й навантаження з індуктивною реакцією в керованому тиристорному випрямлячі?

5.9 За якого характеру навантаження α_{max} є більше й чому має місце це збільшення?

5.10 Як залежить коефіцієнт пульсації від величини кута регулювання α й чому ця залежність має місце?

5.11 Поясніть призначення додаткового діода в схемах випрямлячів (див. рис. 3.1).

5.12 У якій спосіб змінюється коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ за збільшення кута регулювання α?

5.13 Зобразіть функціональну схему керованого випрямляча, поясніть призначення елементів схеми.

5.14 У яких межах має змінюватися кут регулювання задля забезпечення 100 % регулювання напруги в колі навантаження в досліджуваних схемах керованих випрямлячів?

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити за рекомендованою літературою теоретичний матеріал. Вивчити особливості схемотехнічної реалізації схеми керованих та некерованих випрямлячів, процеси функціонування, області застосовування. Ознайомитися із принциповими схемами макета й особливостями їхнього функціонування.

6.2 Дослідити керовані випрямлячі – однофазний однотактний за активного (***k* = 1**) та індуктивного (***k* = 2** – з додатковим діодом ***VD2*** і без нього) характеру навантаження та трифазний однотактний за активного (***k* = 3**) та індуктивного (***k* = 4 –** з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характеру навантаження:

6.2.1 Дослідити зовнішні (навантажувальні) характеристики випрямлячів.

6.2.2 Визначити вихідні опори керованих випрямлячів.

6.2.3 Визначити відсоткові зниження вихідних напруг керованих випрямлячів.

6.2.4 Визначити коефіцієнти використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** керованих випрямлячів.

6.2.5 Дослідити регулювальні характеристики випрямлячів.

6.2.6 Дослідити процеси функціонування керованих випрямлячів за активного й індуктивного характеру навантаження:

- пульсації у вихідному колі блока випрямляння ***БВ*** й у колі навантаження випрямляча;
- електричні процеси (струми й напруги) в елементах і колах керованого випрямляча.

6.3 Дослідити некеровані випрямлячі (керовані випрямлячі за **α = 0**) – однофазний однотактний: за активного (***k* = 1**) та індуктивного (***k* = 2** – з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характері навантаження й трифазний однотактний за активного (***k* = 3**) та індуктивного (***k* = 4** – з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характері навантаження:

6.3.1 Дослідити зовнішні (навантажувальні) характеристики некерованих випрямлячів.

6.3.2 Визначити вихідні опори некерованих випрямлячів.

6.3.3 Визначити відсоткові зниження вихідних напруг некерованих випрямлячів.

6.3.4 Визначити коефіцієнти використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** некерованих випрямлячів.

6.3.5 Дослідити процеси функціонування некерованих випрямлячів за активного й індуктивного характеру навантаження:

- пульсації у вихідному колі блока випрямляння ***БВ*** і в колі навантаження випрямляча;

- електричні процеси (струми й напруги) в елементах і колах випрямляча.

6.4 Опрацювати дослідні дані. Сформулювати висновки за результатами лабораторної роботи.

7 Методика виконання лабораторної роботи

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови керованих та некерованих випрямних пристроїв і процеси їхнього функціонування за матеріалами даної лабораторної роботи й рекомендованою літературою [2.1...2.5]. Вивчити особливості схемотехнічного виконання й функціонування лабораторного макета (див. розд. 3). Одержати у викладача контрольні запитання щодо досліджуваного матеріалу й підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму та обсяг їхнього подання у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування лабораторної роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою для допуску до роботи є з'ясування особливостей схемотехнічної реалізації лабораторного макета (див. розд. 3).

*7.2 До пункту 6.2. Дослідження керованих випрямлячів – однофазного однотактного за активного (**k = 1**) та індуктивного (**k = 2**) (з додатковим діодом **VD1** і без нього) характеру навантаження і трифазного однотактного за активного (**k = 3**) та індуктивного (**k = 4**) (з додатковим діодом **VD1** і без нього) характеру навантаження.*

Забезпечення потрібної схеми (див. рис. 3.2 та 3.3) дослідження (однофазної та трифазної однотактних схем керованих випрямлячів з активним та індуктивним характером навантаження) здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для забезпечення потрібних параметрів елементів схеми й режимів роботи досліджуваного випрямляча може бути використано кнопки швидкого доступу ***“G1”, “TV1”, “ПК”, “L1”, “SW1”, “SW2”, “$R_н$”*** (див. рис. 3.1).

7.2.1 До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик керованих випрямлячів.

Зовнішня характеристика $\boldsymbol{U_н = f(I_н)}$ – це залежність напруги на навантаженні від струму $\boldsymbol{I_н}$ навантаження. У даній роботі досліджуються зовнішні характеристики керованих однотактних випрямлячів – однофазного для активного (***k* = 1**) й індуктивного (***k* = 2**) (з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характеру навантаження та трифазного для активного (***k* = 3**) та індуктивного (***k* = 4** – з додатковим діодом ***VD1*** і без нього) характеру навантаження.

Поступово збільшуючи струм $I_н$ навантаження шляхом змінювання – регулювання опору $R_н$ від режиму ненавантаженого стану за $I_н = 0$ до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму навантаження 5...7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти при цьому значення $I_н$, $R_н$, I_a, U_a, $U_н$. Задані значення занести до табл. 7.1 (***k***), де ***k*** – варіант схеми випрямляча.

Таблиця 7.1 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані					
	$R_н$, Ом	$I_н$, А	$U_н$, В	U_a, В	I_a, А	$\Delta U_н$,В	$\Delta I_н$, А	$r_в$, Ом	S_2, ВА	$P_н$, Вт	K_2
1											
2											
…											

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати варіант схеми випрямляча – **“Однофазна з *R*-навантаженням” (*k* = 1), “Однофазна з *L*-навантаженням” (*k* = 2), “Трифазна з *R*-навантаженням” (*k* = 3), “Трифазна з *L*-навантаженням” (*k* = 4)**;
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (фазна напруга $U_A = U_B = U_C = U_{G1\ ном}$, робоча частота $f_м = f_{м\ ном}$);
- відредагувати параметри трансформатора ***TV1***: установити потрібний коефіцієнт трансформації $n_{12} = n_{12\ ном}$ та активний опір $r_2 = r_{2\ ном}$ вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** ($r_a = r_b = r_c = r_{2\ ном}$);
- відредагувати параметри дроселя ***L1***: установити номінальне значення індуктивності дроселя $L1 = L1_{ном}$;
- відредагувати параметри пристрою керування ***ПК***: установити номінальне значення кута **α** регулювання ($\alpha = \alpha_{ном}$); переконатися, що долучено вихідні сигнали фази ***a*** (для однофазних схем) і фаз ***a, b, c*** (для трифазних схем);
- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”;**
- зняти показання вольтметрів ***PV1, PV2*** відповідно напруги $U_2 = U_a$ вторинні обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a*** й $U_{н\ нс}$ – напруги ненавантаженого стану на виході випрямляча. Результат занести до табл. 7.1 (***k***);

- підімкнути опір $R_н$ навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- змінюючи опір $R_н$ навантаження (використовуючи повзунка "$R_н$" – див. рис. 3.1) від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад, $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти показання: вольтметрів ***PV1, PV2*** – відповідно напруга U_a фази ***a*** трансформатора ***TV1***, $U_н$ – напруга в колі навантаження випрямляча; амперметрів ***PA1, PA2*** – відповідно струм $I_2 = I_a$, споживаний від фази ***a***, і струм $I_н$ у колі навантаження випрямляча. Результат занести до табл. 7.1 (***k***);
- за результатами дослідження побудувати зовнішні характеристики.

Для індуктивного характеру навантаження випрямляча (***k*** = **2**) виконати дослідження для двох варіантів: для однофазного однотактного з додатковим діодом ***VD1*** (при цьому вимикач ***SW2*** слід перевести до замкненого провідного стану) і без діода ***VD1*** (***SW2*** переводиться до розімкненого стану) і для трифазного однотактного випрямляча (***k*** = **4** з додатковим діодом ***VD4*** і без нього).

7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначення вихідних опорів керованих випрямлячів

Вихідний опір випрямляча визначається на підставі здобутих результатів вимірювань п. 7.2. 1 (див. табл. 7.1 (***k***)) за формулами

$$r_в = \Delta U_н / \Delta I_н, \tag{7.1}$$

де $\Delta U_н = U_{н\ max} - U_н$; $\Delta I_н = I_{н\ max} - I_н$; $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження див. табл. 7.1 (***k***).

7.2.3 До пункту 6.2.3. Визначення відсоткових знижень вихідних напруг керованих випрямлячів.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги випрямляча при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\ нс} - U_{н\ ном}}{U_{н\ нс}} \cdot 100\%, \tag{7.2}$$

*7.2.4 Визначення коефіцієнтів використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора **TV1** керованих випрямлячів.*

Коефіцієнт використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** у схемі керованого випрямляча визначається у вигляді

$$K_2 = P_н / S_2, \tag{7.3}$$

де $P_н = I_н U_н$; $S_2 = 3U_a I_a$; $P_н$ – активна потужність у колі навантаження випрямляча; S_2 – габаритна потужність вторинних обмоток трансформатора ***TV1***.

7.2.5 До пункту 6.2.5. Дослідження регулювальних характеристик.

Регулювальна характеристика – це залежність вихідної напруги $U_н$ від кута α регулювання:

$$U_н / U_{н\,max} = \varphi(\alpha), \qquad (7.4)$$

де $U_{н\,max}$ – напруга в колі навантаження за $\alpha = 0$.

При знятті характеристик номінальний струм $I_{н\,ном}$ навантаження за $\alpha = 0$ задає викладач. Для зняття регулювальних характеристик слід виконати таке:

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати потрібну схему (за індуктивного характеру навантаження регулювальні характеристики знімаються для двох варіантів – з додатковим діодом ***VD1*** і без нього);
- підімкнути навантаження $R_н$, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- установити кут α регулювання рівним **0** (крайнє ліве положення повзунка пристрою керування ***ПК***);
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”;**
- змінюючи опір $R_н$ навантаження, встановити номінальне значення струму $I_н$ навантаження ($I_н = I_{н\,ном}$);
- змінюючи кут регулювання, наприклад із кроком 20^0**,** зняти

регулювальну характеристику. Результат занести до табл. 7.2 (***k***);

- в одній системі координат накреслити регулювальні характеристики для активного й індуктивного характеру навантаження;
- визначити максимальний кут α_{max} регулювання для кожного виду навантаження;
- розрахувати й заповнити розрахункову частину таблиці 7.2 (***k***) $U_н/U_{н\,max}$, використовуючи експериментальні дані табл. 7.2 (***k***) і U_0, $U_0/U_{0\,max}$:

для однофазної схеми (***k*** **= 1**)

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{2\pi}(1+\cos\alpha);$$

$$U_{0\,max} = U_{2m}/\pi;$$

$$\frac{U_0}{U_{0\,max}} = \frac{I_0}{I_{0\,max}} = \frac{1+\cos\alpha}{2};$$

для трифазної (***k*** **= 3**)

$$U_0 = \begin{cases} U_{0\,max}\cos\alpha & \text{за } \alpha \le \dfrac{\pi}{6}; \\ \dfrac{U_{0\,max}}{\sqrt{3}}\left[1+\cos\left(\dfrac{\pi}{6}+\alpha\right)\right] & \text{за } \alpha \ge \dfrac{\pi}{6}; \end{cases}$$

$$U_{0\,max} = 1{,}17U_2;$$

$$\frac{U_0}{U_{0max}} = \frac{I_0}{I_{0max}} = \begin{cases} \cos\alpha & \text{за } \alpha \le 30^\circ; \\ 1+\cos(30^\circ+\alpha) & \text{за } \alpha \ge 30^\circ. \end{cases}$$

Таблиця 7.2 (***k***) – **Результати досліджень**

α**, град**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**
Експериментальна частина								
$U_н$								
Розрахункова частина								
$U_н / U_{н\,max}$								
U_0								
$U_0 / U_{0\,max}$								

7.2.6 До пункту 6.2.6. Дослідження процесів функціонування керованих випрямлячів.

Для дослідження процесів функціонування керованих схем випрямляння слід обрати (див. рис. 3.1) потрібну схему (однофазну, трифазну з активним чи індуктивним характером навантаження).

*Дослідження пульсацій у вихідних колах блока випрямляння **БВ** та навантаження керованого випрямляча*

Для вимірювання параметрів змінних складових на виході блока випрямляння ***БВ*** частоти $f_{ви}$ і розмаху $\Delta U_{в\sim}$ напруги $u_0(t)$ і розмаху $\Delta I_{в\sim}$ струму $i_0(t)$ слід підімкнути осцилограф до контрольних точок: у першому випадку до "P_0, U" – напруга $u_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ*** (див. табл. 3.3), а в другому – до ***"P_0, I"*** (струм $i_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ*** – див. табл. 3.3).

Для вимірювання параметрів змінних складових у колі навантаження випрямляча частоти $f_{ни}$ і розмаху $\Delta U_{н\sim}$ напруги $u_н(t)$ і розмаху $\Delta I_{н\sim}$ струму $i_н(t)$ слід підімкнути осцилограф до контрольних точок: у першому випадку – до ***"$R_н$, U"*** – напруга $u_н(t)$ навантаження $R_н$ випрямляча (див. табл. 3.3), а в другому – ***"$R_н$, I"*** – струм $i_н(t)$ у колі навантаження $R_н$ випрямляча.

Експериментальні значення частот $f_{ви}$ та $f_{ни}$ досліджуваних процесів визначаються за осцилограмами відповідно $u_0(t)$ та $u_н(t)$. Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду T спостережуваної кривої, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал T визначається добутком двох величин $T = nl$: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю у поділках і значення величини n часу на поділку у даному положенні перемикача **"Час/Поділка"**. У цьому разі

$$f = 1/T = 1/nl.$$

При вимірюванні параметрів змінних складових ($f_{ви}$, $\Delta U_{в\sim}$, $\Delta I_{в\sim}$, $f_{ни}$, $\Delta U_{н\sim}$, $\Delta I_{н\sim}$) осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової ПС вимкнено – рис. В.13) підсилювача вертикального посилення.

Методика дослідження фільтрувальних властивостей згладжувальних фільтрів припускає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до табл. 7.3 (***k***)):

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати варіант схеми випрямляча – **“Однофазна з *R*-навантаженням” (*k* = 1), “Однофазна з *L*-навантаженням” (*k* = 2), “Трифазна з *R*-навантаженням” (*k* = 3), “Трифазна з *L*-навантаженням” (*k* = 4)**;
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (фазна напруга $U_A = U_B = U_C = U_{G1\ ном}$, робоча частота $f_м = f_{м\ ном}$);
- відредагувати параметри трансформатора ***TV1***: установити потрібний коефіцієнт трансформації $n_{12} = n_{12\ ном}$ й активний опір $r_2 = r_{2\ ном}$ вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** фази ***a*** (r_a), фази ***b*** (r_b), фази ***c*** (r_c) ($r_a = r_b = r_c = r_{2\ ном}$);
- відредагувати параметри дроселя ***L1***: установити номінальне значення індуктивності дроселя $L1 = L1_{ном}$;
- відредагувати параметри схеми пристроя керування ***ПК***: установити номінальне значення кута α регулювання ($\alpha = \alpha_{ном}$); для однофазних схем переконатися, що долучено вихідні сигнали керування фази α (для однофазних схем) і фаз ***a, b, c*** (для трифазних схем);
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”** (рис. 3.1);
- установити опір $R_н = R_{ном}$ у колі навантаження випрямляча, використовуючи повзунка “$R_н$” (див. рис. 3.1), що забезпечує значення струму $I_н = I_{н\ ном}$;
- зняти показання вольтметра ***PV2*** й амперметра ***PA2***. Результати вимірювань $U_н$ та $I_{н\ ном}$ занести до табл. 7.3 (***k***);
- виміряти розмах $\Delta U_{в\sim}$ і частоту $f_{ви}$ пульсації напруги на виході блока випрямляння ***БВ*** за осцилограмою напруги $u_0(t)$ (контрольна точка P_0, U відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{в\sim}$ пульсації струму на виході блока випрямляння ***БВ*** за осцилограмою $i_0(t)$ (P_0, I);
- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження випрямляча за осцилограмою напруги $u_н(t)$ (контрольна точка $R_н$, U відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{н\sim}$ пульсації струму в колі навантаження випрямляча за осцилограмою $i_н(t)$ ($R_н$, I – табл. 3.3);

- виконати аналогічні вимірювання за струмів $I_{н}$ навантаження, $0{,}75I_{н\ ном}$, $0{,}5I_{н\ ном}$ й $0{,}25I_{н\ ном}$, використовуючи повзунка "$R_{н}$" – див. рис. 3.5 (результати досліджень занести до табл. 7.3 (***k***));
- виконати (тільки для трифазних схем $k = 3$ й $k = 4$) аналогічні вимірювання за $I_{н\ ном}$ за відсутності одного з сигналів керування $u_{к}(\omega t)$ на виході пристрою керування ***ПК***;
- дослідження з даної методики виконати для чотирьох варіантів ***k*** схем випрямлячів ($k = 1, 2, 3, 4$);
- для варіантів $k = 2$ та $k = 4$ виконати аналогічні вимірювання за різних значень індуктивності дроселя ***L1*** з додатковим діодом ***VD1*** і без нього – результати досліджень занести до табл. 7.4 **(*k*)**.

Використовуючи результати експерименту (табл. 7.3 **(*k*)**, 7.4 **(*k*)**), розрахувати й заповнити розрахункову частину таблиць 7.3 **(*k*)**, 7.4 **(*k*)** з урахуванням наведених далі співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначити нормовані частоти

$$\overline{f}_{ви} = f_{ви} / f_{м}; \quad \overline{f}_{ни} = f_{ни} / f_{м}.$$

Коефіцієнти пульсацій на виході блока випрямляння ***БВ*** (струму $K_{пв}$ і напруги $K_{пвU}$) у колі навантаження (струму $K_{пн}$ і напруги $K_{пнU}$) випрямляча:

$$K_{пв} = \frac{\Delta I_{в\sim}}{2I_{н}}; \qquad K_{пн} = \frac{\Delta I_{н\sim}}{2I_{н}};$$

$$K_{пвU} = \frac{\Delta U_{в\sim}}{2U_{н}}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_{н}}.$$

Коефіцієнти згладжування за струмом S_i та напругою S_U визначаються з урахуванням коефіцієнтів пульсації:

$$S_i = K_{пв} / K_{пн}; \quad S_U = K_{пвU} / K_{пнU}.$$

Результати розрахунків $\overline{f}_{ви}$, $\overline{f}_{ни}$, $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, S_U відбити в розрахунковій частині таблиць 7.3 (***k***) та 7.4 **(*k*)**.

За результатами досліджень побудувати робочі характеристики $K_{пв}$, $K_{пн}$, $K_{пвU}$, $K_{пнU}$, S_i, $S_U = f$ **(*I*н, *C1*, *L1*)**.

Дослідження електричних процесів керованого випрямляча

За допомогою осцилографа макета спостерігати осцилограми напруг та струмів відповідно до прийнятих позначень (див. табл. 3.3):

- напруга $u_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- струм $i_a(t)$ вторинної обмотки трансформатора ***TV1*** фази ***a***;
- напруга $u_0(t)$ і струм $i_0(t)$ на виході блока випрямляння ***БВ*** (контрольна точка P_0);
- напруга $u_{н}(t)$ на опорі $R_{н}$ навантаження;

- напруга $u_{ка}(t)$ на виході пристрою керування ***ПК*** фази ***a*** й т.д. (відповідно до табл. 3.3).

Діаграми слід зобразити в одному масштабі по горизонталі.

Таблиця 7.3 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина								Розрахункові дані							
	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1																
2																
…																

Таблиця 7.4 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина									Розрахункові дані							
	$L1$, мГн	$I_н$, А	$U_н$, В	$f_{ви}$, Гц	$\Delta U_{в\sim}$, В	$\Delta I_{в\sim}$, А	$f_{ни}$, Гц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пв}$	$K_{пвU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	S_i	S_U
1																	
2																	
…																	

7.3 До пункту 6.3. Дослідження некерованих випрямлячів (керованих випрямлячів за α ***= 0)*** *– однофазного за активного (**k = 1**) та індуктивного (**k = 2**) (з додатковим діодом **VD1** і без нього) характеру навантаження й трифазного за активного (**k = 3**) та індуктивного (**k = 4**) (з додатковим діодом **VD1** і без нього) характеру навантаження.*

Забезпечення потрібної схеми дослідження, варіанта ***k*** (**k = 1, 2, 3, 4**) випрямляча здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для забезпечення потрібних параметрів елементів схеми та режимів роботи досліджуваного випрямляча може бути використано кнопки швидкого доступу ***"G1", "TV1", "ПК", "L1", "SW1", "SW2", "$R_н$"*** (див. рис. 3.1).

Електричні процеси в елементах та колах однотактних схем некерованих і керованих при α **= 0** випрямлячів є ідентичні. Тому для дослідження некерованих випрямлячів – і однофазного однотактного, і трифазного однотактного в досліджуваних схемах (***k* = 1, 2, 3, 4**) – слід встановити кут регулювання α **= 0.** Для цього можна використати повзунка "***ПК***":

підвести курсор миші до повзунка, натиснути ліву кнопку й, не відпускаючи її, пересунути в крайнє ліве положення.

7.3.1 До пункту 6.3.1. Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик некерованих випрямлячів.

Дослідження зовнішніх характеристик некерованих випрямлячів провадиться відповідно до п. 7.2.1 за таких самих параметрах елементів схеми, за яких досліджувалися й однойменні керовані випрямлячі.

7.3.2 До пункту 6.3.2. Визначення вихідних опорів некерованих випрямлячів.

Вихідні опори некерованих випрямлячів визначаються на підставі здобутих результатів таблиці 7.1 (***k***) за співвідношеннями (7.1).

7.3.3 До пункту 6.3.3. Визначення відсоткових знижень вихідних напруг випрямлячів.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги випрямляча при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається відповідно до співвідношення (7.2).

*7.3.4 До пункту 6.3.4. Визначення коефіцієнтів використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора **TV1** некерованих випрямлячів.*

Коефіцієнт використовування за потужністю вторинних обмоток трансформатора ***TV1*** у схемі досліджуваного некерованого випрямляча визначається відповідно до співвідношення (7.3).

7.3.5 До пункту 6.3.5. Дослідження процесів функціонування некерованих випрямлячів.

Дослідження процесів функціонування некерованих випрямлячів провадиться відповідно до пункту 7.2.6 за таких самих параметрів елементів схеми, за яких досліджувалися однойменні схеми керованих випрямлячів.

7.4 До пункту 6.4. Висновки за результатами досліджень схем випрямляння.

Користуючись даними дослідів пп. 6.2 й 6.3, розрахувати, побудувати й виконати аналіз:

- регулювальних характеристик досліджуваних схем керованих випрямлячів;
- зовнішніх характеристик досліджуваних схем керованих і некерованих випрямлячів;

За здобутими результатами дослідження керованих і некерованих схем випрямляння слід сформулювати висновки. У цих висновках слід відбити особливості процесів функціонування кожної схеми, результати аналізу схем випрямляння за основними показниками, здобуваними експериментально.

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципові електричні, функціональні, структурні схеми однофазних та трифазних керованих і некерованих випрямлячів;

8.2 результати досліджень відповідно до пп. 6.1...6.4:

- таблиці з результатами вимірювань та розрахунків;
- осцилограми струмів і напруг в елементах та колах схеми керованого випрямляча за навантаження активного та індуктивного характеру;
- графіки зовнішніх та регулювальних характеристик

$$U_н,\ r_в,\ S_2,\ K_2 = f(I_н);$$

$$U_н,\ U_н/U_{н\ max},\ U_0/\ U_{0\ max} = f(\alpha);$$

$$\overline{f}_{вu}\ ,\ \overline{f}_{нu}\ ,\ K_{пв},\ K_{пвU},\ K_н,\ K_{нU},\ S_i,\ S_U = f\ (I_н,\ L1);$$

8.3 висновки й порівняльну оцінку здобутих результатів.

МОДУЛЬ 2

2 ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Лабораторна робота № 2.1
Дослідження перетворювача постійної напруги із самозбудженням

1 Мета роботи

Вивчення схем та принципи функціонування транзисторних перетворювачів постійної напруги. Дослідження їхніх характеристик і показників якості.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С.46-68, С. 163–197.

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др.; Электропитание устройств связи. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 139–224.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС.: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. –М.: Высшая школа, 1991. – С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др.; Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975. – § 9.1, 9.2, 9.3.

3 *Опис лабораторного макета*

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження транзиторного перетворювача постійної напруги за чотирьох варіантів навантаження: активного характеру (***k* = 1**), індуктивного характеру (***k* = 2**), ємнісного характеру (***k* = 3**) і при використанні **Г**-подібного ***LC***-фільтра (***k* = 4**).

У макеті міститься тільки одна досліджувана схема. Її стислий опис наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваної схеми**

№ п/п	Позначення в макеті	Опис	№ рис.
1	Перетворювач	Транзисторний перетворювач постійної напруги (схема Ройера)	3.2

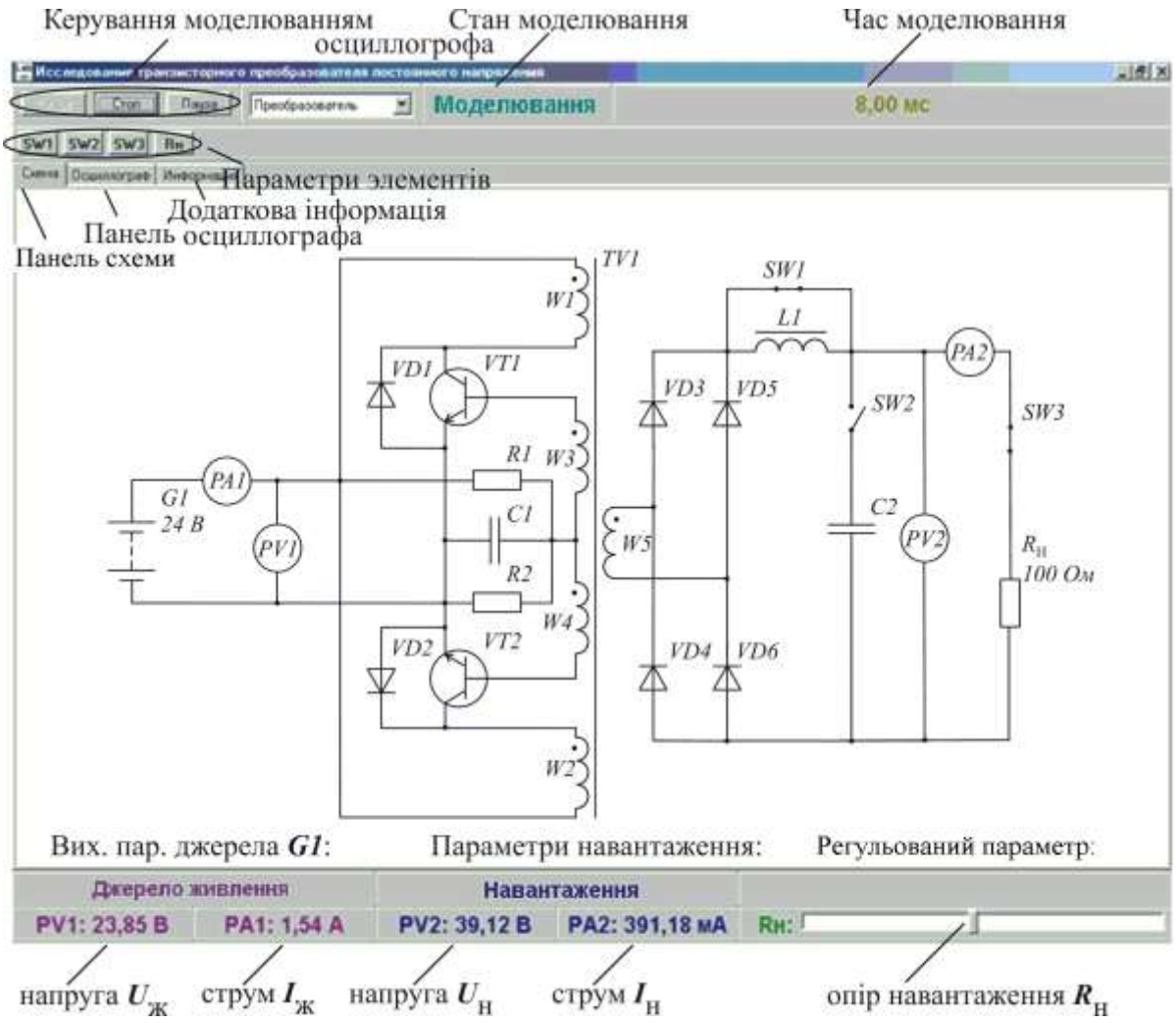


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Лабораторний макет містить:

- джерело – генератор ***G1*** постійної напруги U_{G1};
- чотири варіанти ***k*** (***k*** = **1, 2, 3, 4**) навантаження перетворювача: без згладжувального фільтра – активний характер навантаження (***k*** = **1**), індивідуальний фільтр (***k*** = **2**), ємнісний фільтр (***k*** = **3**) і **Г**-подібний ***LC***-фільтр (***k*** = **4**);
- транзисторний інвертор, який містить елементи ***VT1***, ***VT2***, ***VD1***, ***VD2***, ***R1***, ***R2***, ***SW1***, ***SW2***, ***C1***, ***T1***;
- мостовий випрямляч, який містить елементи ***VD3…VD6***;
- згладжувальний фільтр, утворений елементами ***L1*** та ***C2***;
- опір $R_н$ навантаження перетворювача (з можливістю його вимикання та вмикання вимикачем ***SW1***);
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** напруги $U_ж$ на виході джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** струму $I_ж$, споживаного від джерела живлення ***G1***;

- вольтметр ***PV2*** напруги $U_н$ на виході перетворювача;
- амперметр ***PA2*** струму $I_н$ навантаження перетворювача.

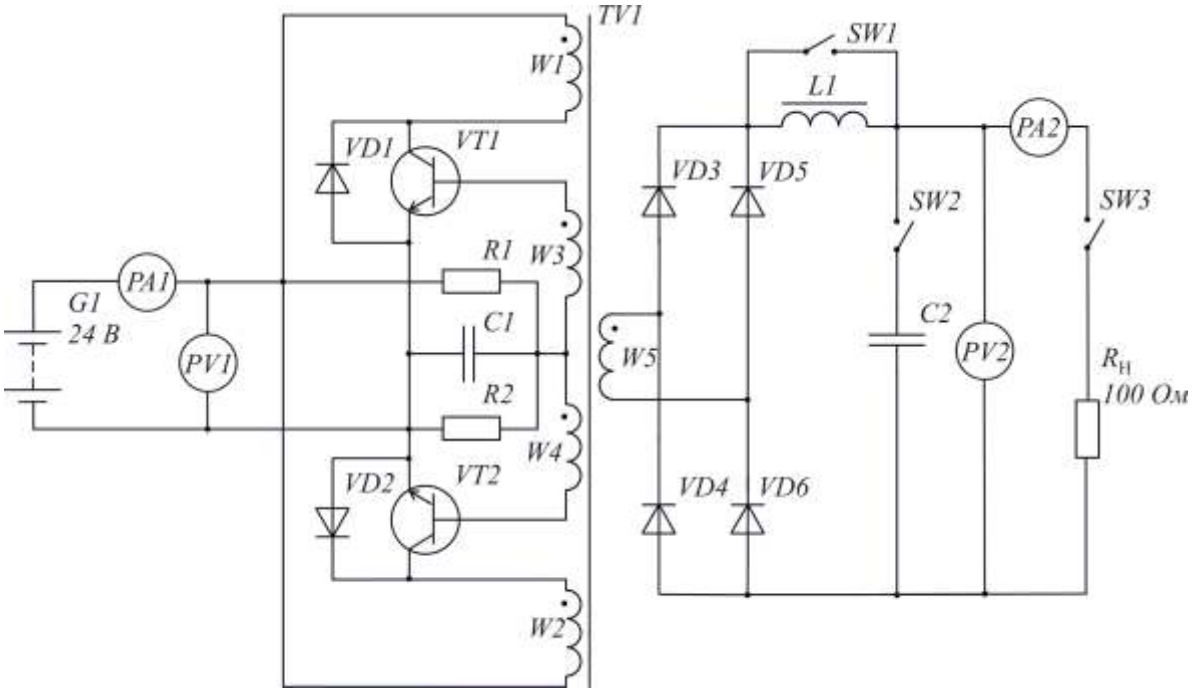


Рисунок 3.2 – Досліджувана схема

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1***, перетворювача постійної напруги на змінну – інвертора (***R1***, ***R2***, ***C1***, ***VT1***, ***VT2***, ***VD1***, ***VD2***, ***TV1***), випрямного блока ***VD3***...***VD6***, згладжувального фільтра ***L1***, ***C2*** й опору навантаження $R_н$. Опір навантаження $R_н$ вимикається за допомогою вимикача ***SW3***. За допомогою вимикачів ***SW1***, ***SW2*** можна встановити чотири варіанти ***k*** **(*k* = 1, 2, 3, 4)** навантаження перетворювача:

- робота на активне навантаження (***k*** **= 1**: ***SW1*** ввімкнений – переведений до замкненого провідного стану, ***SW2*** вимкнений – переведений до розімкненого непровідного стану);
- робота на індуктивне навантаження (***k*** **= 2**: ***SW1*** вимкнений, ***SW2*** вимкнений);
- робота на ємнісне навантаження (***k*** **= 3**: ***SW1*** ввімкнений, ***SW2*** ввімкнений);
- робота на Г-подібний фільтр (***k*** **= 4**: ***SW1*** вимкнений, ***SW2*** ввімкнений).

Перелік елементів макета подано в табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено опір резистора навантаження $R_н$.

Середні значення напруги $U_ж$ і струму $I_ж$ джерела первинного елекроживлення контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1.*** Середні значення напруги $U_н$ та струму $I_н$ навантаження $R_н$

Таблиця 3.2 – **Склад лабораторного макета**

Позиція	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело постійної напруги					
C1	Конденсатор					
C2	Конденсатор					
VT1	Біполярний транзистор					n-p-n
VT2	Біполярний транзистор					n-p-n
TV1	Трансформатор					
VD1	Діод					
VD2	Діод					
VD3	Діод					
VD4	Діод					
VD5	Діод					
VD6	Діод					
L1	Дросель					
R1	Резистор					
R2	Резистор					
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач дроселя ***L1***
SW2	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач конденсатора ***C2***
SW3	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Середнє значення

вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг і струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи схеми. Тривалість розгортки становить 0,001…2000 мс/клітину. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	Осцилограми електричних процесів
G1, U	Напруга $u_{ж}(t)$ на виході джерела ***G1***
G1, I	Струм $i_{ж}(t)$, споживаний від джерела ***G1***
***TV1,* Магн. потік**	Магнітний потік $\Phi(t)$ трансформатора ***T1***
TV1, U1	Напруга $u_{W1}(t)$ на обмотці ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, I1	Струм $i_{W1}(t)$ обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, U2	Напруга $u_{W2}(t)$ на обмотці ***W2*** трансформатора ***TV1***
TV1, I2	Струм $i_{W2}(t)$ обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1***
TV1, U3	Напруга $u_{W3}(t)$ на обмотці ***W3*** трансформатора ***TV1***
TV1, I3	Струм $i_{W3}(t)$ обмотки ***W3*** трансформатора ***TV1***
TV1, U4	Напруга $u_{W4}(t)$ на обмотці ***W4*** трансформатора ***TV1***
TV1, I4	Струм $i_{W4}(t)$ обмотки ***W4*** трансформатора ***TV1***
TV1, U5	Напруга $u_{W5}(t)$ на обмотці ***W5*** трансформатора ***TV1***
TV1, I5	Струм $i_{W5}(t)$ обмотки ***W5*** трансформатора ***TV1***
$VT1, U_{ке}$	Напруга $u_{VT1}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT1***
$VT1, I_{к}$	Струм $i_{VT1}(t)$ колектора транзистора ***VT1***
$VT1, U_{бе}$	Напруга $u_{бVT1}(t)$ база–емитер транзистора ***VT1***
$VT1, I_{б}$	Струм $i_{бVT1}(t)$ бази транзистора ***VT1***
$VT2, U_{ке}$	Напруга $u_{VT2}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT2***
$VT2, I_{к}$	Струм $i_{VT2}(t)$ колектора транзистора ***VT2***
$VT2\ U_{бе}$	Напруга $u_{бVT2}(t)$ база–емітер транзистора ***VT2***
$VT2, I_{б}$	Струм $i_{бVT2}(t)$ бази транзистора ***VT2***
VD1, U	Напруга $u_{VD1}(t)$ поміж катодом і анодом діода ***VD1***
VD1, I	Струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
VD2, U	Напруга $u_{VD2}(t)$ поміж катодом і анодом діода ***VD2***
VD2, I	Струм $i_{VD2}(t)$ діода ***VD2***
L1, U	Напруга $u_{L1}(t)$ на дроселі ***L1***
L1, I	Струм $i_{L1}(t)$ дроселя ***L1***
C2, U	Напруга $u_{C2}(t)$ на конденсаторі ***C2***
C2, I	Струм $i_{C2}(t)$ конденсатора ***C2***
$R_{н}, U$	Напруга $u_{н}(t)$ на навантаженні
$R_{н}, I$	Струм $i_{н}(t)$ навантаження

4 Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] і методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної та функціональної побудови транзисторних перетворювачів постійної напруги;

- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів транзисторних перетворювачів постійної напруги;
- процеси функціонування у транзисторних перетворювачах постійної напруги із самозбудженням та з незалежним збудженням (з підсилювачем потужності);
- особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, необхідну, на думку студента, для виконання лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача, мету кожного досвіду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

5 Контрольні запитання

5.1 З яких функціональних вузлів складається напівпровідниковий перетворювач постійного струму із самозбудженням і яке їхнє призначення?

5.2 З яких функціональних вузлів складається напівпровідниковий перетворювач постійного струму з підсилювачем потужності і яке їхнє призначення?

5.3 Поясніть принципи функціонування напівпровідникового перетворювача із самозбудженням з непрямокутною (лінійною) і прямокутною петлею гістерезису осердя трансформатора.

5.4 Поясніть принципи функціонування напівпровідникового перетворювача з підсилювачем потужності.

5.5 Чому в транзисторних перетворювачах використовується прямокутна форма змінної напруги й від яких чинників залежить ця форма?

5.6 Що являє собою зовнішня (навантажувальна) характеристика транзисторного перетворювача? Поясніть її.

5.7 Чому транзисторні перетворювачі постійного струму мають відносно високий к. к. д. ? Поясніть причини його підвищення за зменшення частоти перетворювання перетворювача.

5.8 У чому полягають достоїнства й недоліки транзисторних перетворювачів постійного струму?

5.9 Наведіть схему побудови перетворювача з комутувальним трансформатором. Поясніть особливості її роботи. Дайте порівняльну характеристику різних схем перетворювачів постійної напруги із самозбудженням.

5.10 Чи можна у складі силової частини перетворювача використовувати транзистори іншої структури? Якщо так, то які зміни в схемі слід зробити, щоби застосовувати ці транзистори?

5.11 Зобразити діаграми струмів і напруг у колах схеми, зазначених викладачем.

5.12 Поясніть особливості роботи досліджуваної схеми в режимі короткого замикання в колі навантаження.

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних перетворювачів постійної енергії, а також процеси їхнього функціонування.

6.2 Дослідити схему транзисторного перетворювача із самозбудженням за чотирьох варіантів навантаження: активного характеру (***k* = 1**), індуктивного характеру (***k* = 2**), ємнісного характеру (***k* = 3**) і при використовуванні **Г**-подібного ***LC***-фільтра (***k* = 4**):

6.2.1 Зняти зовнішні (навантажувальні) характеристики перетворювача (за ***k*** = 1…4).

6.2.2 Визначити вихідні опори й відсоткові зниження вихідних напруг перетворювача.

6.2.3 Визначити коефіцієнти корисної дії перетворювача.

6.2.4 Експериментально визначити залежність змінювання частоти перетворювання перетворювача за змінювання струму навантаження від мінімуму до максимуму.

6.2.5 Дослідити процеси функціонування перетворювача:

- пульсації у вхідних і вихідних колах перетворювача;
- електричні процеси (струми й напруги) в елементах і колах перетворювача.

6.3 Сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних перетворювачів постійного струму й процеси їхнього функціонування за [2.1..2.5] і матеріалами даної лабораторної роботи.

Вивчити особливості схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд. 3).

Одержати у викладача контрольні запитання з вивченого матеріалу й підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму та обсяг їхнього подання в звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для виконання роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторної установки.

7.2 До пункту 6.2. Дослідження транзисторного перетворювача постійного струму із самозбудженням.

Потрібний варіант ***k*** навантаження перетворювача забезпечується комутацією перемикачів ***SW1, SW2*** (рис. 3.1). За замкненого провідного стану перемикача ***SW3*** забезпечується робота перетворювача під навантаженням, а за розімкненого – у режимі ненавантаженого стану.

7.2.1 До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик перетворювача.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на навантаженні від струму, що проходить через нього: $U_н = f(I_н)$.

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати 5…7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $I_ж$, $U_ж$, $U_н$, $T_{пр.}$ Здобуті значення занести до табл. 7.1 (***k***), де ***k*** – варіант навантаження перетворювача (***k*** = 1, 2, 3, 4).

Таблиця 7.1 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані						
	$I_н$, А	$U_н$, В	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$T_{пер}$, с	$\Delta U_н$, В	$\Delta I_н$, А	$r_{пер}$, Ом	$P_ж$, Вт	$P_н$, Вт	$f_{пер}$, Гц	η, %
1												
2												
…												

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW3*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”;**
- зняти напругу ненавантаженого $\Delta U_{н\ нс}$ стану перетворювача. Результат занести до табл. 7.1 (***k***);
- увімкнути опір $R_н$ навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого, провідного стану;
- змінюючи опір $R_н$ навантаження (використовуючи повзунка “$R_н$” – див. рис. 3.1, правий нижній кут) від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад, $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти показання: вольтметрів ***PV1, PV2*** – відпо-

відно напруга $U_ж$ на виході джерела ***G1*** та $U_н$ – напруга в колі навантаження перетворювача; амперметрів ***PA1, PA2*** – відповідно струм $I_п$, споживаний від джерела ***G1***, і струм $I_н$ у колі навантаження перетворювача. Результат занести до табл. 7.1 (***k***);

- за результатами дослідження побудувати зовнішні характеристики.
- аналогічно виконати дослідження для решти варіантів ***k*** навантаження перетворювача.

7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначення вихідних опорів відсоткових знижень вихідної напруги перетворювача.

Вихідний опір перетворювача визначається за формулой

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н = (U_{н\ max} - U_н)/(I_{н\ max} - I_н),$$

де $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги та струму навантаження.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги перетворювача при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\ нс} - U_{н\ ном}}{U_{н\ нс}} \cdot 100\% .$$

7.2.3 До пункту 6.2.3. Визначення коефіцієнта корисної дії перетворювача.

Коефіцієнт корисної дії перетворювача визначається через значення потужностей на виході $P_н$ ($P_н = I_н U_н$) і на вході $P_ж$ ($P_ж = I_ж U_ж$):

$$\eta = P_н / P_ж.$$

7.2.4 До пункту 6.2.4. Експериментальне визначення частоти перетворювання.

Експериментальне значення робочої частоти перетворювача визначається за осцилограмою ($u_{W1}(t)$ (***TV1, U1*** – відповідно до табл. 3.3) або $u_{W2}(t)$ (***TV1***, ***U2***)). Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду $T_{пр}$ кривої, яка спостерігається, використовуючи значення величини ***n*** множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал ***T*** визначається добутком ($T = ln$) двох величин: довжини ***l*** вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю в поділках і значення величини ***n*** часу на поділку у даному положенні перемикача **"Час/ Поділка"**. У даному разі

$$f_{пер} = 1/T_{пер} = 1/ [illegible] \cdot n .$$

7.2.5 До пункту 6.2.5. Дослідження процесів функціонування перетворювача.

Осцилограми величин, які спостерігаються, слід зображувати на інтервалі 1,5…2 періоди. Вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів постійного струму з урахуванням постійної складової (окрім випадків дослідження змінних складових, наприклад напруги $u_{ж}(t)$ на вході та напруги $u_{н}(t)$ на виході перетворювача, напруги $u_{C1}(t)$, …) …

Дослідження пульсацій у вхідних та вихідних колах перетворювачів

Методика дослідження пульсацій у вхідних і вихідних колах імпульсних перетворювачів передбачає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до табл. 7.2.(*k*)):

- установити опір $R_{н} = R_{ном}$ у колі навантаження ***ПЕЕ***, використовуючи повзунка "$R_{н}$" (див. рис. 3.1);
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"** – рис. 3.1;
- зняти показання вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2***. Результати вимірювань $U_{ж}$, $U_{н}$ й $I_{ж}$, $I_{н}$ занести до табл. 7.2 (*k*);
- виміряти розмах $\Delta U_{ж\sim}$ і частоту $f_{жи}$ пульсації напруги в колі живлення – у вхідному колі перетворювача за осцилограмою напруги $u_{ж}(t)$ (контрольна точка "***G1, U"*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{ж\sim}$ пульсації струму в колі живлення – у вхідному колі перетворювача за осцилограмою $i_{ж}(t)$ (***G1, I***);
- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження перетворювача за осцилограмою напруги $u_{н}(t)$ (контрольна точка $R_{н}$, U відповідно до табл. 3.3);
- виміряти $\Delta I_{R\sim}$ пульсації струму в опорі $R_{н}$ за осцилограмою струму $i_{н}(t)$ ($R_{н}$, I – табл. 3.3);
- дослідження з даної методики виконати для чотирьох варіантів *k* навантаження перетворювача за струмів навантаження $I_{ном}$ та $0{,}5I_{ном}$ – результати досліджень занести до табл. 7.2 **(*k*).**

Використовуючи результати експерименту (табл. 7.2 **(*k*)**), розрахувати й заповнити розрахункову частину таблиці 7.3 **(*k*)** з урахуванням наведених далі співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначити коефіцієнти пульсацій і нормовані частоти:

$$\overline{f}_{жи} = f_{жи} / f_{ПК}\,; \quad \overline{f}_{ни} = f_{ни} / f_{ПК} \quad .$$

Таблиця 7.3 (***k***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина										
	$I_н$, А	$I_ж$, А	$U_ж$, В	$U_н$, В	$R_н$, Ом	$f_{жи}$, кГц	$\Delta U_{ж\sim}$, В	$\Delta I_{ж\sim}$, А	$f_{ни}$, кГц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{R\sim}$, А
1											
2											
…											

Коефіцієнти пульсацій на вході (струму $K_{пж}$ і напруги $K_{пжU}$), у колі навантаження (струму $K_{пнR}$ і напруги $K_{пнU}$) перетворювача розраховуються у вигляді

$$K_{пж} = \frac{\Delta I_{ж\sim}}{2I_ж}; \quad K_{пнR} = \frac{\Delta I_{R\sim}}{2I_н};$$

$$K_{пжU} = \frac{\Delta U_{ж\sim}}{2U_ж}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_н}.$$

Таблиця 7.4 (***k***) – **Результати розрахунків**

№ вим	Розрахункові дані					
	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пж}$	$K_{пжU}$	$K_{пнU}$	$K_{пнR}$
1						
2						
…						

Дослідження електричних процесів перетворювачів

При зображенні осцилограм слід правильно зазначити вісь часу. Змінюючи опір $R_н$ навантаження, встановити номінальне значення струму навантаження $I_н = I_{н\ ном}$. Спостерігати й відбити зміну форми діаграм в осцилограмах за струмів навантаження $I_{н\ ном}$ та $0{,}5I_{н\ ном}$, зберігаючи їхні амплітудні й часові співвідношення.

Спостерігати й зарисувати осцилограми електричних процесів в елементах і колах перетворювача відповідно до таблиці 3.3:

- змінна складова напруги $u_{C2}(t)$ на конденсаторі ***C2***;
- струм $i_{VT1}(t)$ колектора транзистора ***VT1***;

- струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***;
- струм $i_{L1}(t)$ дроселя ***L1***;
- змінні складові напруг $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$ та $u_ж(t)$ на вході перетворювача й т. д.

Діаграми слід зобразити в одному масштабі по горизонталі.

7.3 До пункту 6.3. Висновки за результатами роботи. Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даної лабораторної роботи.

Висновки щодо виконаної роботи повинні містити стисло й чітко сформульовані положення, у яких розкривається суть спостеріганих явищ або здобуваних графічних залежностей. Висновки не повинні констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, пояснюючи засадничу відмінність одного випадку від іншого (наприклад сталість робочої частоти перетворювача із зовнішнім самозбудженням і змінювання її в перетворювачі із самозбудженням за змінювання струму навантаження й т. д).

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципову схему перетворювача із самозбудженням;

8.2 таблиці вимірювань та обчислень;

8.3 графіки робочих характеристик перетворювача за різних видів (k = 1, 2, 3, 4) навантаження: $U_н$, $P_н$, $r_{пер}$, η, $f_{пер} = f(I_н)$ – як функції струму $I_н$ навантаження $K_{пж}$, $K_{пжU}$, $K_{пнU}$, $K_{пнR} = f(I_н)$;

8.4 висновки з порівняльного аналізу досліджуваних характеристик;

8.5 осцилограми струмів і напруг в елементах і колах схеми перетворювача;

8.6 висновки з порівняльного аналізу досліджуваних характеристик перетворювача за різних видів навантаження.

Лабораторна робота № 2.2
Дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (знижувального, підвищувального та інвертувального типів)

1 Мета роботи

Вивчення принципів функціонування та особливостей схемотехнічної реалізації імпульсних перетворювачів постійної напруги з гальванічним зв'язком вхідних і вихідних кіл. Дослідження їхніх зовнішніх та регулювальних характеристик.

Освоєння методики експериментального визначання основних характеристик імпульсних перетворювачів постійної напруги.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С.46-68, С. 163–197..

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др.; Электропитание устройств связи. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 139–224.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС.: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. –М.: Высшая школа, 1991. – С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др.; Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975. – § 9.1, 9.2, 9.3.

3 Опис лабораторного макета

Склад і можливості лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги знижувального (***k* = 1**), підвищувального (***k* = 2**) і інвертувального (***k* = 3**) типів за коефіцієнтів трансформації $n_{21} = 1$, $n_{21} > 1$, $n_{21} < 1$.

У табл. 3.1 наведено стислий опис схем, які розміщені у даному лабораторному макеті.

Лабораторний макет містить:

- джерело ***G1*** постійної напруги U_{G1};
- пристрій (схему) керування ***ПК***;

- силовий канал ***СК*** імпульсного перетворювача постійної напруги, утворений елементами ***VT1, VD1, L1, C1***;
- опір $R_н$ навантаження перетворювача;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** напруги $U_ж$ на виході джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** струму $I_ж$, споживаного від джерела живлення ***G1***;
- вольтметр ***PV2*** вихідної напруги $U_н$ перетворювача;
- амперметр ***PA2*** струму $I_н$ навантаження перетворювача.

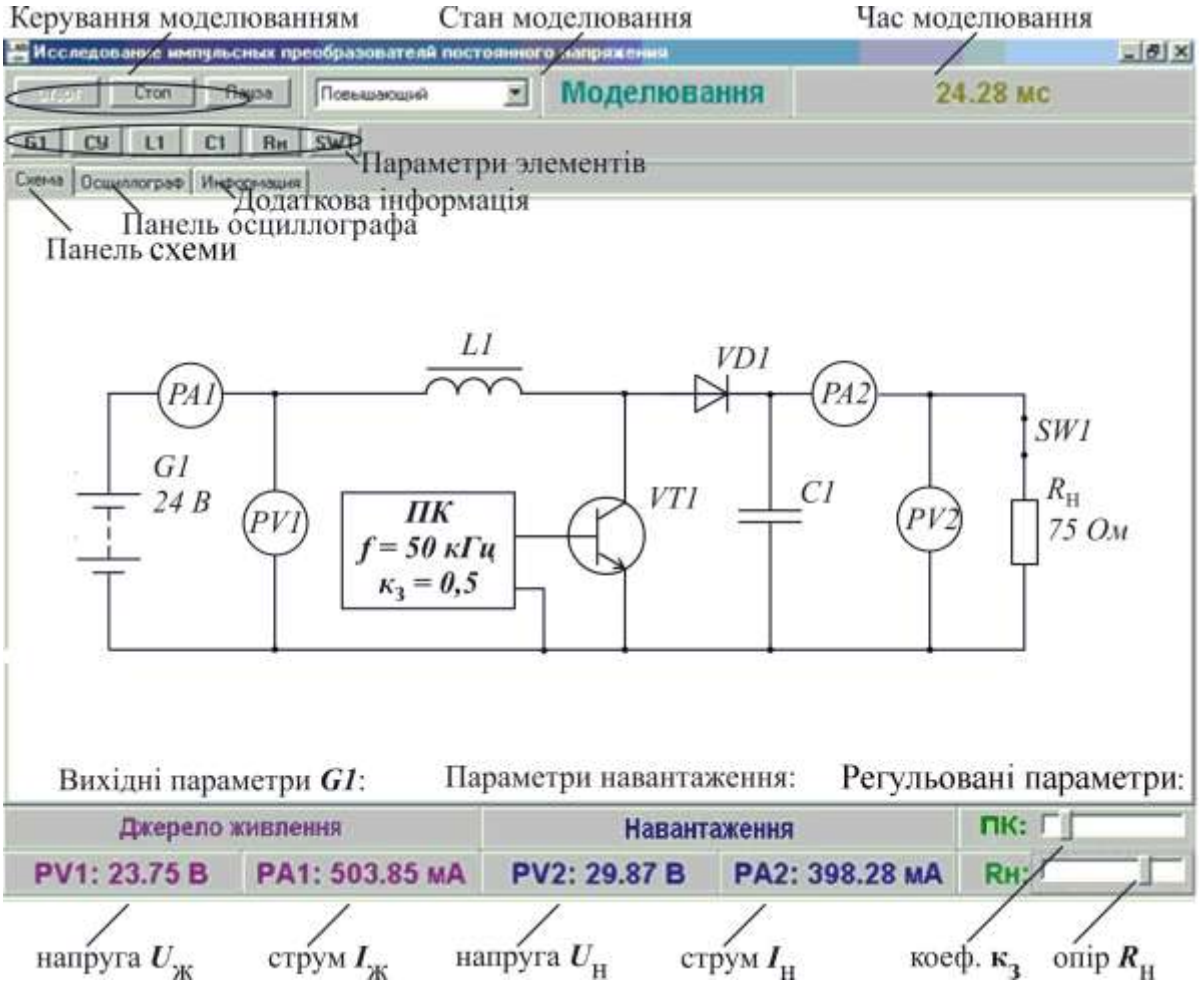


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Лабораторний макет складається із джерела первинного електроживлення ***G1***, перетворювача постійної напруги ***VT1***, ***VD1, L1, C1*** й опору навантаження $R_н$. Опір навантаження $R_н$ вимикається за допомогою вимикача ***SW1***. Керований ключовий елемент перетворювача (транзистор ***VT1***) скеровується імпульсами від пристроя керування ***ПК***. Список елементів макета подано у табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено опір резистора навантаження $R_н$ і коефіцієнт заповнювання імпульсів пристрою керування ***ПК***.

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваних схем**

y	**Позначення в макеті**	**Опис**	**№ рис.**
1	Знижувальний	Транзисторний перетворювач знижувального типу, з можливістю автотрансформаторного вмикання дроселя	3.2
2	Підвищувальний	Транзисторний перетворювач підвищувального типу з можливістю автотрансформаторного вмикання дроселя	3.3
3	Інвертувальний	Транзисторний перетворювач інвертувального типу з можливістю автотрансформаторного вмикання дроселя	3.4

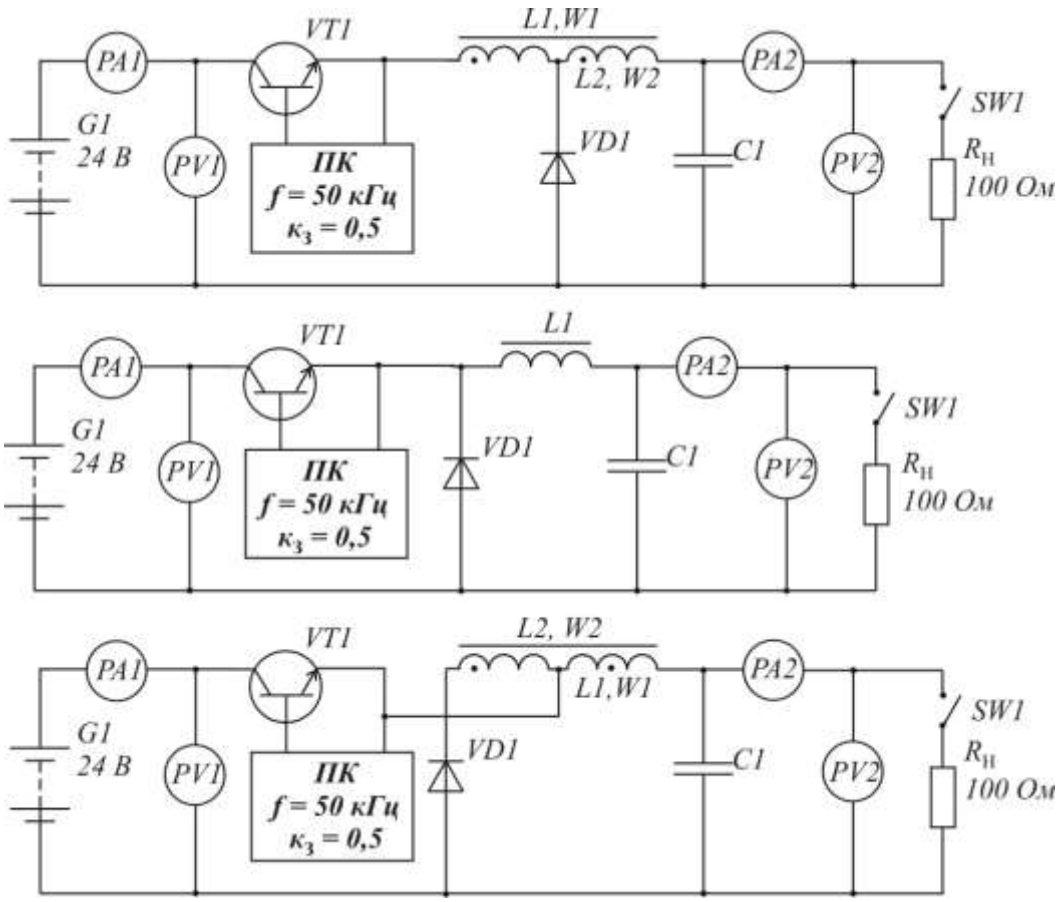


Рисунок 3.2 – Перетворювач знижувального типу (y = 1)

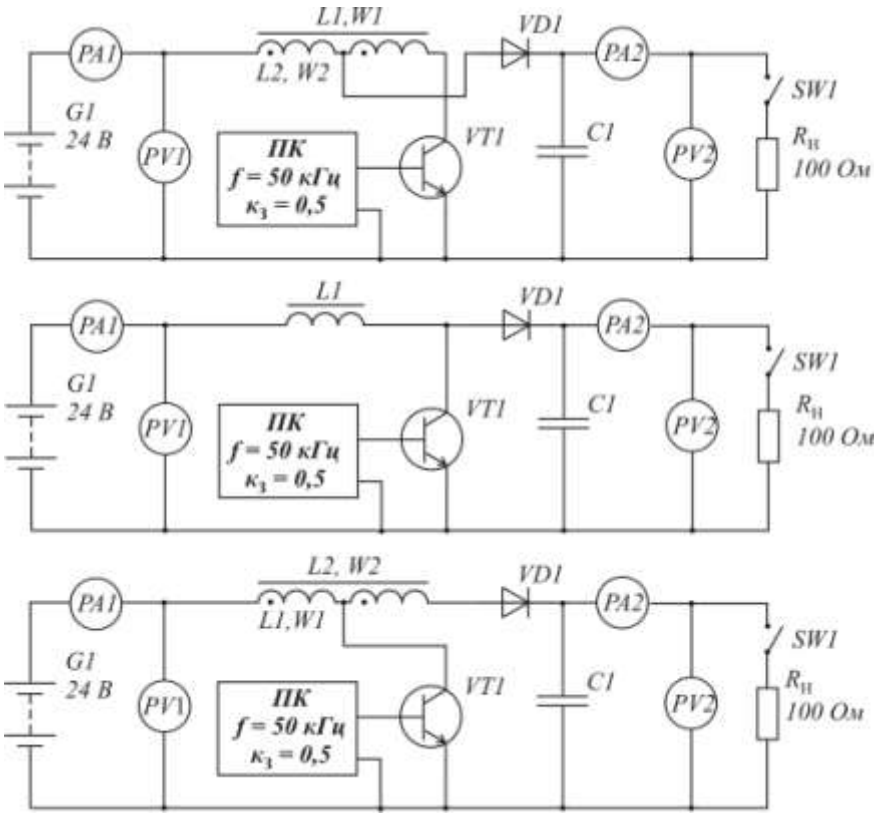


Рисунок 3.3 – Перетворювач підвищувального типу (***y* = 2**)

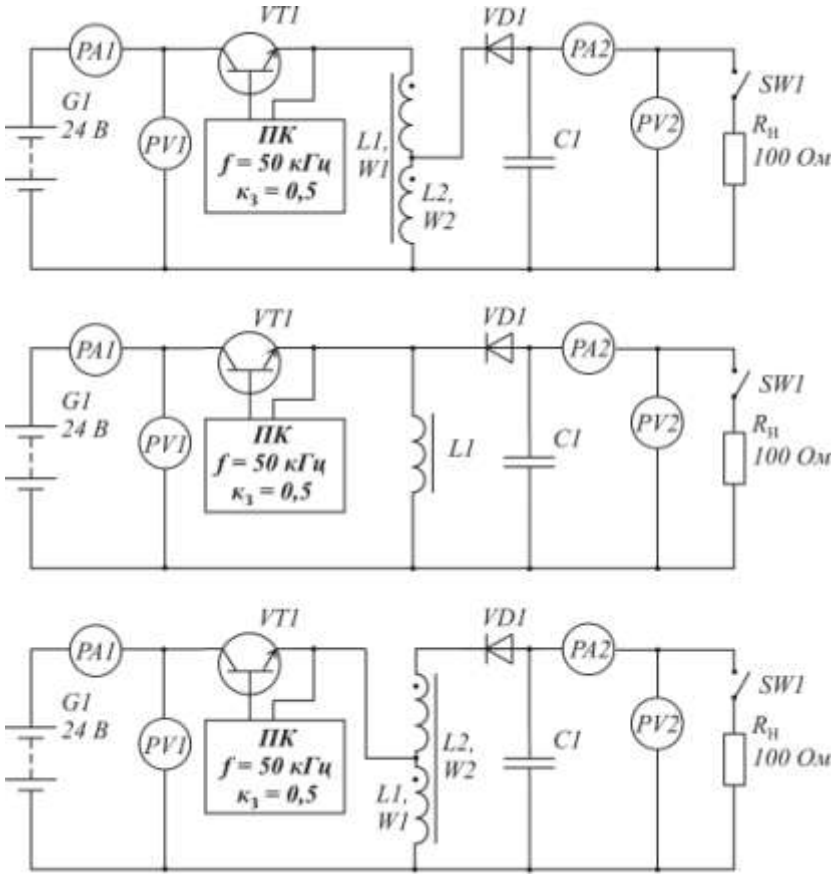


Рисунок 3.4 – Перетворювач інвертуючого типу (y = 3)

Середні значення напруги та струму джерела первинного електроживлення контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги $U_н$ і струму $I_н$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотирипромінний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг і струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа відбувається автоматично, відповідно до роботи пристроя керування ***ПК***. Тому тривалість розгортки проградуйовано в частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список досліджуваних параметрів і контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.2 – **Склад лабораторного макета**

№ поз.	**Тип елемента**	**Регульовані параметри**				**Примітка**
		параметр	**мін.**	**макс.**	**од. вим.**	
G1	Джерело постійної напруги	Напруга	3	100	В	
		Внутрішній опір	0,01	1	Ом	
C1	Конденсатор	Ємність	1	470	мкФ	
VT1	Біполярний транзистор					n-p-n
L1	Дросель	Індуктивність обмотки нагромадження	1	200	мкГн	
		Коефіцієнт трансформації	0,2	5		
VD1	Діод					
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Середнє значення
ПК	ШІМ-контролер	Частота	1	3000	кГц	
		Коефіцієнт заповнювання	0,01	0,99		Оперативне регулювання

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	**Осцилограми електричних процесів**
ПК, $U_{вих}$	Напруга $u_к(t)$ на виході пристроя керування ***ПК***
G1, U	Напруга $u_ж(t)$ джерела живлення ***G1***
G1, I	Струм $i_ж(t)$ джерела живлення ***G1***
L1, W1_U	Напруга $u_{W1}(t)$ на обмотці ***W1*** дроселя ***L1***
L1, W1_I	Струм $i_{W1}(t)$ обмотки ***W1*** дроселя ***L1***
L1, W2_U	Напруга $u_{W2}(t)$ на обмотці ***W2*** дроселя ***L1***
L1, W2_I	Струм $i_{W2}(t)$ обмотки ***W2*** дроселя ***L1***
VD1, U	Напруга $u_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
VD1, I	Струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***
VT1, $U_{ке}$	Напруга $u_{VT1}(t)$ колектор-емітер транзистора ***VT1***
VT1, $I_{ке}$	Струм $i_{VT1}(t)$ колектора транзистора ***VT1***
C1, U	Напруга $u_{C1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{C1}(t)$ конденсатора ***C1***
$R_н$, U	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$
$R_н$, I	Струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$
За коефіцієнта трансформації $n_{21} = 1$ дросель має одну обмотку; у цьому разі напруги та струми обмоток ***W1*** та ***W2*** збігаються.	

Опис пристроя керування ПК

Пристрій керування являє собою багатоканальний контролер імпульсних сигналів з широтно-імпульсною модуляцією. На рис. 3.5 зображено вікно редагування параметрів пристроя керування. Список параметрів, які редагуються, можна поділити на дві категорії: спільні для всіх каналів та індивідуальні для кожного каналу.

До спільних параметрів належать: частота роботи, коефіцієнт заповнювання та амплітуда вихідних імпульсів, кількість фаз, а також вид виходу (однотактний чи двотактний).

Індивідуально для кожного каналу настроюються зміщення відносно початку періоду (у відсотках) та відносне змінювання ширини імпульсів (щодо ширини, установленої коефіцієнтом заповнювання). Кожен канал можна також індивідуально вимикати.

У даній роботі використовування індивідуальних настройок каналу не має значення, оскільки використовується всього один канал, призначений для роботи з однотактними схемами.

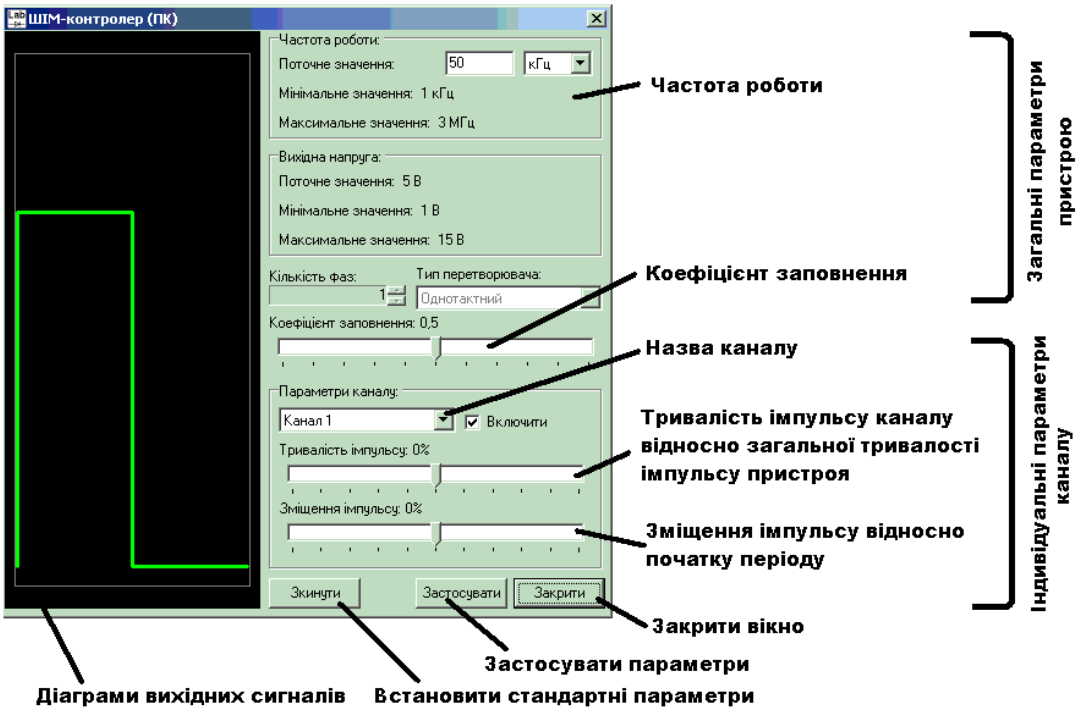


Рисунок 3.5 – Пристрій керування ***ПК***

Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови регульованих транзисторних перетворювачів постійної напруги без гальванічної розв'язки вхідних і вихідних кіл;
- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів транзисторних регульованих перетворювачів постійної напруги;
- процеси функціонування транзисторних регульованих перетворювачів постійної напруги без гальванічної розв'язки;
- особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для подальшого виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача, мету кожного досвіду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

5 Контрольні запитання

5.1 Де й для якої мети використовуються імпульсні перетворювачі електричної енергії (їхнє місце, призначення для живлення апаратури зв'язку)?

5.2 У чому полягає імпульсний метод перетворювання електричної енергії?

5.3 Які існують способи регулювання (стабілізації) вихідної напруги (струму) у перетворювачах електричної енергії?

5.4 Зобразіть схеми силових каналів знижувального, підвищувального й інвертувального типів.Охарактеризуйте переваги й недоліки кожної з наведених схем.

5.5 Зобразіть діаграми струмів дроселя перетворювача знижувального типу за неперервного, граничного й переривчастого режимах роботи. Пояснить їх.

5.6 Зобразіть діаграму напруги на виході силового ключа перетворювача знижувального типу. В який спосіб вона змінюється в режимі стабілізації:

- за змінювання напруги живлення в разі незмінного опору $\boldsymbol{R_н}$ ($\boldsymbol{R_н}$ **= const**);
- за змінювання опору $\boldsymbol{R_н}$ у разі незмінної, постійної напруги $\boldsymbol{U_ж}$ джерела живлення ($\boldsymbol{U_ж}$ **= const**).

5.7 Що являє собою зовнішня (навантажувальна) характеристика імпульсного перетворювача? Від чого залежить характер її змінювання?

5.8 Пояснить основні показники якості імпульсного перетворювача: коефіцієнт корисної дії (к.к.д.), коефіцієнт стабілізації (в режимі стабілізації), коефіцієнт заповнювання, коефіцієнт пульсації, коефіцієнт згладжування.

5.9 У який спосіб визначаються на підставі експериментальних даних вихідний опір, к.к.д., коефіцієнт заповнювання, коефіцієнт пульсації, коефіцієнт згладжування імпульсного перетворювача?

5.10 Укажіть кола протікання струму дроселя на інтервалах нагромаджування, повертання й паузи у схемах імпульсних перетворювачів досліджуваних типів ($\boldsymbol{y}$ **= 1, 2, 3**).

5.11 У який спосіб впливають частота перетворювання та параметри силових комутувальних елементів на масогабаритні показники, енергетичні втрати й к. к. д. імпульсних перетворювачів?

5.12 Які можливі режими роботи за імпульсного перетворювання електричної енергії? Від чого залежить режим імпульсного перетворювання електричної енергії?

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних перетворювачів постійної напруги з гальванічним зв'язком, а також процеси їхнього функціонування.

6.2 Дослідити схеми транзисторних перетворювачів знижувального (***y* = 1**), підвищувального (***y* = 2**) та інвертувального (***y* = 3**) типів за коефіцієнтів трансформації $n_{21} = 1$, $n_{21} > 1$, $n_{21} < 1$.

6.2.1 Зняти зовнішні (навантажувальні) характеристики перетворювачів.

6.2.2 Визначити вихідні опори й відсоткові зниження вихідних напруг перетворювачів.

6.2.3 Визначити коефіцієнти корисної дії перетворювачів.

6.2.4 Експериментально визначити залежність змінювання частоти перетворювання перетворювачів за зміни струму навантаження.

6.2.5 Дослідити регулювальні характеристики перетворювачів.

6.2.6 Дослідити процеси функціонування перетворювачів:

- пульсації у вхідних та вихідних колах перетворювачів;
- електричні процеси (струми й напруги) в елементах і колах перетворювачів.

6.3 Сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних перетворювачів постійного струму з гальванічним зв'язком вхідних і вихідних кіл, процеси їхнього функціонування за [2.1...2.5] і матеріалами даної лабораторної роботи. Вивчити особливості схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд. 3).

Одержати у викладача контрольні запитання щодо вивченого матеріалу й підготувати відповіді. Уточнити у викладача форму й обсяг подання відповідей у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для виконування роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторного макета.

*7.2 До пункту 6.2. Дослідження транзисторних перетворювачів постійної напруги знижувального (**y = 1**), підвищувального (**y = 2**) та інвертувального (**y = 3**) типів.*

Забезпечення потрібної схеми дослідження, типу (***y* = 1, 2, 3**) силового каналу перетворювача здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для забезпечення потрібних параметрів елементів схеми та режимів роботи досліджуваних перетворювачів може бути використано кнопки швидкого доступу **"*G1*", "*ПК*", "*L1*", "*C1*", "$R_н$", "*SW1*"** (див. рис. 3.1).

Забезпечення потрібного коефіцієнта (**$n_{21} = 1$, $n_{21} < 1$, $n_{21} > 1$**) трансформації дроселя ***L1*** провадиться в діалоговому вікні редагування (задля його появи використовується кнопка "***L1***" на панелі елементів – рис. 3.1).

7.2.1 До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішніх (навантажувальних) характеристик перетворювачів.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на навантаженні $U_н$ від струму $I_н$, навантаження $U_н = f(I_н)$. Значення коефіцієнтів заповнювання пристрою керування для зняття зовнішніх характеристик задає викладач. Зовнішні характеристики слід зняти за трьох значень коефіцієнта $к_з$ заповнення.

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму навантаження 5...7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $I_ж$, $U_ж$, $U_н$, $T_{пер}$. Задані значення занести до таблиці 7.1 (***y***), де y – тип силового каналу (***y*** = 1, 2, 3).

Таблиця 7.1 (***y***) – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані			
	$I_н$, А	$U_н$, В	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$T_{пер}$, мкс	$P_ж$, Вт	$P_н$, Вт	$f_{пер}$, Гц	η, %
$n_{21} < 1$									
1 2 …									
$n_{21} = 1$									
1 2 …									
$n_{21} > 1$									
1 2 …									

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати схему перетворювача;
- відредагувати параметри джерела ***G1*** (***$U_{G1} = U_{G1\ ном}$***, внутрішній опір ***$r_1 = r_{1\ ном}$***);
- відредагувати параметри дроселя ***L1***: установити потрібний коефіцієнт ***n_{21}*** трансформації й значення ***$L1 = L1_{ном}$*** ;
- відредагувати параметри пристроя керування ***ПК***: установити необхідні значення частоти ***$f = f_{ПК}$*** та коефіцієнта **$к_з$** заповнювання;
- відредагувати параметри конденсатора ***C1*** – значення ємності ***$C1 = C1_{ном}$*** ;
- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”**;
- зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2***: відповідно напруги ***$U_ж$*** на виході джерела ***G1*** та ***$U_{н\ нс}$*** – напруги ненавантаженого стану на виході перетворювача. Результат занести до табл. 7.1 (***y***);
- підімкнути опір ***$R_н$*** навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- змінюючи опір ***$R_н$*** навантаження (за допомогою повзунка “***$R_н$***” – див. рис. 3.1, правий нижній кут) від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад: ***$R_н$*** = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2***. Результат занести до табл. 7.1 (***y***);
- за результатами дослідження побудувати зовнішні характеристики.

Аналогічно виконати дослідження для решти типів ***y*** схем перетворювачів.

7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначення вихідних опорів та відсоткових знижень вихідних напруг перетворювачів.

Вихідний опір перетворювача визначається на підставі здобутих результатів вимірювань п. 7.2.1 за формулою

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н = (U_{н\ max} - U_н)/(I_{н\ max} - I_н),$$

де $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження (див. табл. 7.1 (***y***)).

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги перетворювача при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{\text{н}\%} = \frac{U_{\text{н нс}} - U_{\text{н ном}}}{U_{\text{н нс}}} \cdot 100\% .$$

7.2.3 До пункту 6.2.3. Визначення коефіцієнтів корисної дії перетворювачів

Коефіцієнт корисної дії η (див. табл. 7.1 (**у**)) перетворювача визначається з урахуванням результатів вимірювань п. 7.2. 1 через значення потужностей на його виході $P_{\text{н}}$ ($P_{\text{н}} = I_{\text{н}}U_{\text{н}}$) і вході $P_{\text{ж}}$ ($P_{\text{ж}} = I_{\text{ж}}U_{\text{ж}}$):

$$\eta = P_{\text{н}}/P_{\text{ж}}.$$

7.2.4. До пункту 6.2.5. Експериментальне визначення частоти перетворювання

Експериментально значення робочої частоти перетворювача визначається за осцилограмою $u_{VT1}(t)$ (*VT1*, $U_{\text{ке}}$ – відповідно до табл. 3.3). Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду $T_{\text{пер}}$ кривої, яка спостерігається, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал $T_{\text{пер}}$ визначається добутком ($T_{\text{пер}} = nl$) двох величин: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю у поділках (кількість поділок (клітин) за період $T_{\text{пер}}$) і значення величини часу на поділку у даному положенні перемикача **"Час/Поділка"** (масштаб частоти осцилографа мкс/поділку тс/поділку …). Відповідно частота перетворювання визначається як

$$f_{\text{пер}} = 1/T_{\text{пер}} = 1/(l \cdot n).$$

7.2.5 До пункту 6.2.5. Дослідження регулювальних характеристик перетворювачів

Регулювальна характеристика – це залежність вихідної напруги від коефіцієнта заповнювання пристрою керування $U_{\text{н}} = f(\text{к}_{\text{з}})$. При знятті характеристик (за трьох значень коефіцієнта n_{21} трансформації) опір навантаження задає викладач. Для зняття регулювальних характеристик слід виконати таке:

- за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1) обрати схему перетворювача;
- відредагувати параметри джерела *G1* ($U_{G1} = U_{G1\ \text{ном}}$, внутрішній опір $r_1 = r_{1\ \text{ном}}$);
- відредагувати параметри дроселя *L1*: установити потрібний коефіцієнт n_{21} трансформації та значення індуктивності $L1 = L1_{\text{ном}}$;
- відредагувати (див. рис. 3.5) параметри пристроя керування *ПК*: установити потрібні значення частоти $f_{ПК}$ та коефіцієнта $\text{к}_{\text{з}}$ заповнення;

- відредагувати параметри конденсатора ***C1*** – значення ємності $C1 = C1_{ном}$;
- установити потрібний опір $R_н$ навантаження: $R_н = R_{н\ ном}$;
- установити мінімальне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"**;
- змінюючи коефіцієнт $к_з$ заповнювання (повзунок "***ПК***" – див. рис. 3.1, правий нижній кут), зняти регулювальну характеристику. Результати вимірювань занести до табл. 7.2 (***у***).

Таблиця 7.2 (***у***) – **Результати вимірювань**

$к_з$		0,01	0,10	0,25	0,50	0,75	0,90	0,99
$U_н$, В	$n_{21} < 1$							
	$n_{21} = 1$							
	$n_{21} > 1$							

7.2.6. До пункту 6.2.6. Дослідження процесів функціонування перетворювачів.

Осцилограми величин, які спостерігаються, слід зображувати на інтервалі 1,5…2 періоди. Вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів постійного струму з урахуванням постійної складової (окрім випадків дослідження змінних складових, наприклад напруги $u_ж(t)$ на вході, напруги $u_н(t)$ на виході перетворювача, напруги $u_{с1}(t)$, **…**).

Дослідження пульсацій у вхідних та вихідних колах перетворювачів

Методика дослідження пульсацій у вхідних та вихідних колах імпульсних перетворювачів припускає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до табл. 7.3 (***у***)):

- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напруга $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, вихідний опір $r_1 = r_{1\ ном}$);
- відредагувати параметри пристроя керування ***ПК***:
  установити потрібну частоту $f = f_{ПК}$ роботи схеми ***ПК***;
- установити потрібне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання вихідної напруги $u_к(t)$ пристрою керування ***ПК***;
- установити опір $R_н = R_{ном}$ у колі навантаження перетворювача повзунок "$R_н$" (див. рис. 3.1);
- відредагувати параметри елементів ***L1*** ($L1 = L1_{ном}$, $n_{21} = 1$), ***C1*** ($C1 = C1_{ном}$), використовуючи відповідно кнопки "***L1***", "***C1***" на панелі елементів (рис. 3.1).
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"** – рис. 3.1;

- зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2***. Результати вимірювань $U_{ж}$, $U_{н}$ та $I_{ж}$, $I_{н}$ занести до табл. 7.3 (***y***);
- виміряти розмах $\Delta U_{ж\sim}$ та частоту $f_{жи}$ пульсації напруги в колі живлення – у вхідному колі перетворювача за осцилограмою напруги $u_{ж}(t)$ (***G1, U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{ж\sim}$ пульсації струму в колі живлення – у вхідному колі перетворювача за осцилограмою $i_{ж}(t)$ (***G1, I*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження перетворювача за осцилограмою напруги $u_{н}(t)$ (контрольна точка $R_{н}$, ***U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{н\sim}$ пульсації струму у вихідному колі перетворювача за осцилограмами $i_2(t)$ – для $y = 1$, i_{VD1} – для $y = 2$ й $y = 3$ (відповідно ***L1, W1_I*** та ***VD1, I*** – див. табл. 3.3);
- виміряти $\Delta I_{R\sim}$ пульсації струму в опорі $R_{н}$ за осцилограмою струму $i_{н}(t)$ ($R_{н}$, ***I*** – див. табл. 3.3);
- виконати дослідження з даної методики для перетворювачів знижувального ($y = 1$), підвищувального ($y = 2$), та інвертувального ($y = 3$) типів за $n_{21} = 1$ за різних значень індуктивності дроселя ***L1*** (***L1*** = **var,** наприклад ***L1*** = $1{,}5L1_{ном}$, $0{,}5L1_{ном}$, **…**) – результати досліджень занести до табл. 7.3 **(*y*).**

Використовуючи результати експерименту (табл. 7.3 **(*y*)**), розрахувати й заповнити таблицю 7.4 **(*y*)** з урахуванням наведених далі співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначати коефіцієнти пульсацій та нормовані частоти.

Коефіцієнти пульсацій на вході (струму $K_{пж}$ і напруги $K_{пжU}$), на виході (струму $K_{пн}$ і напруги $K_{пнU}$), у колі навантаження (струму $K_{пнR}$) перетворювача розраховуються у вигляді

$$K_{пж} = \frac{\Delta I_{ж\sim}}{2I_{ж}}; \quad K_{пн} = \frac{\Delta I_{н\sim}}{2I_{н}}, K_{пнR} = \frac{\Delta I_{R\sim}}{2I_{н}};$$

$$K_{пжU} = \frac{\Delta U_{ж\sim}}{2U_{ж}}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_{н}}.$$

Нормовані частоти на вході $\overline{f}_{пи}$ й виході $\overline{f}_{ни}$ перетворювача визначимо у вигляді

$$\overline{f}_{жи} = f_{жи} / f_{ПК}; \quad \overline{f}_{ни} = f_{ни} / f_{ПК} \quad .$$

Таблиця 7.3 (*у*) – **Результати досліджень**

№ вим.	Експериментальна частина												
	$L1$, мкГн	$I_н$, А	$I_ж$, А	$U_ж$, В	$U_н$, В	$R_н$, Ом	$f_{жи}$, кГц	$\Delta U_{ж\sim}$, В	$\Delta I_{ж\sim}$, А	$f_{ни}$, кГц	$\Delta U_{н\sim}$, В	$\Delta I_{н\sim}$, А	$\Delta I_{R\sim}$, А
1 2 …													

Таблиця 7.4 (*у*) – **Результати розрахунків**

№ вим.	Розрахункові дані						
	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пж}$	$K_{пжU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	$K_{пнR}$
1 2 …							

Дослідження електричних процесів перетворювачів

При зображенні осцилограм правильно вкажіть вісь часу. Змінюючи опір $R_н$ навантаження, слід установити номінальне значення струму навантаження $I_н = I_{н\,ном}$. Спостерігати й відбити зміну форми діаграм в осцилограмах за струмів навантаження $I_{н\,ном}$ та $0{,}5I_{н\,ном}$, зберігаючи їхні амплітудні й часові співвідношення.

Спостерігати й зарисувати осцилограми електричних процесів в елементах і колах перетворювача відповідно до табл. 3.3:

- напруга $u_к(t)$ на виході пристрою керування ***ПК***;
- змінна складова напруги $u_{C1}(t)$ на конденсаторі ***C1***;
- струм $i_{VT1}(t)$ колектора транзистора ***VT1***;
- струм $i_{VD1}(t)$ діода ***VD1***;
- струм $i_{L\,1}(t)$ дроселя ***L1***;
- змінні складові напруг $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$ та $u_ж(t)$ – на вході перетворювача й т. д.

Діаграми слід зобразити в одному масштабі по горизонталі.

7.3 До пункту 6.3. Висновки за результатами роботи. Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даної методичної розробки.

Висновки щодо виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, в яких розкрито сутність спостережуваних явищ чи віднайдених графічних залежностей. Висновки не повинні констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, пояснюючи принципову відмінність одного випадку від іншого (на-

приклад сталість робочої частоти перетворювача із зовнішнім збудженням та змінювання її у перетворювачі зі збудженням в умовах змінювання струму навантаження й т. д).

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципові схеми перетворювачів знижувального (***y* = 1**), підвищувального (***y* = 2**) та інвертувального (***y* = 3**) типів;

8.2 таблиці вимірювань та обчислень;

8.3 графіки робочих характеристик перетворювачів

$$U_н, P_н, r_{пер}, \eta, f_{пер} = f(I_н);$$

$$U_н = f(к_З);$$

$$K_{пж}, K_{пжU}, K_{пн}, K_{пнU}, K_{пнR} = f(L1).$$

виконані в єдиній координатній системі;

8.4 осцилограми досліджених напруг і струмів елементів перетворювача;

8.5 висновки з аналізу досліджених характеристик перетворювача.

Лабораторна робота № 2.3
Дослідження півмостового перетворювача постійної напруги

1 Мета роботи

Вивчення принципів схемотехнічної реалізації та функціонування імпульсних перетворювачів електричної енергії, експериментальне дослідження двотактного півмостового перетворювача постійної напруги. Дослідження зовнішніх та регулювальних характеристик півмостового перетворювача із зовнішнім збудженням та особливостей його схемотехнічної реалізації.

Освоєння методики експериментального визначання головних характеристик перетворювачів постійної напруги.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.;Под ред. Ю.Д. Козляева – М.: Радио и связь, 1998. – С.46-68, С. 163–197.

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др. Электропитание устройств связи. –М.: Радио и связь, 1981. – С. 139–224.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986 – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др. Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975. § 9.1, 9.2 , 9.3.

3 Опис лабораторного макета

Склад і можливості лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження півмостового перетворювача постійної напруги.

У макеті міститься лише одна досліджувана схема (рис. 3.2), стислий опис якої наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваної схеми**

№ п/п	Позначення в макеті	Опис	№ рис.
1	Півмостовий	Високочастотний імпульсний перетворювач постійної напруги, виконаний за півмостовою схемою	3.2

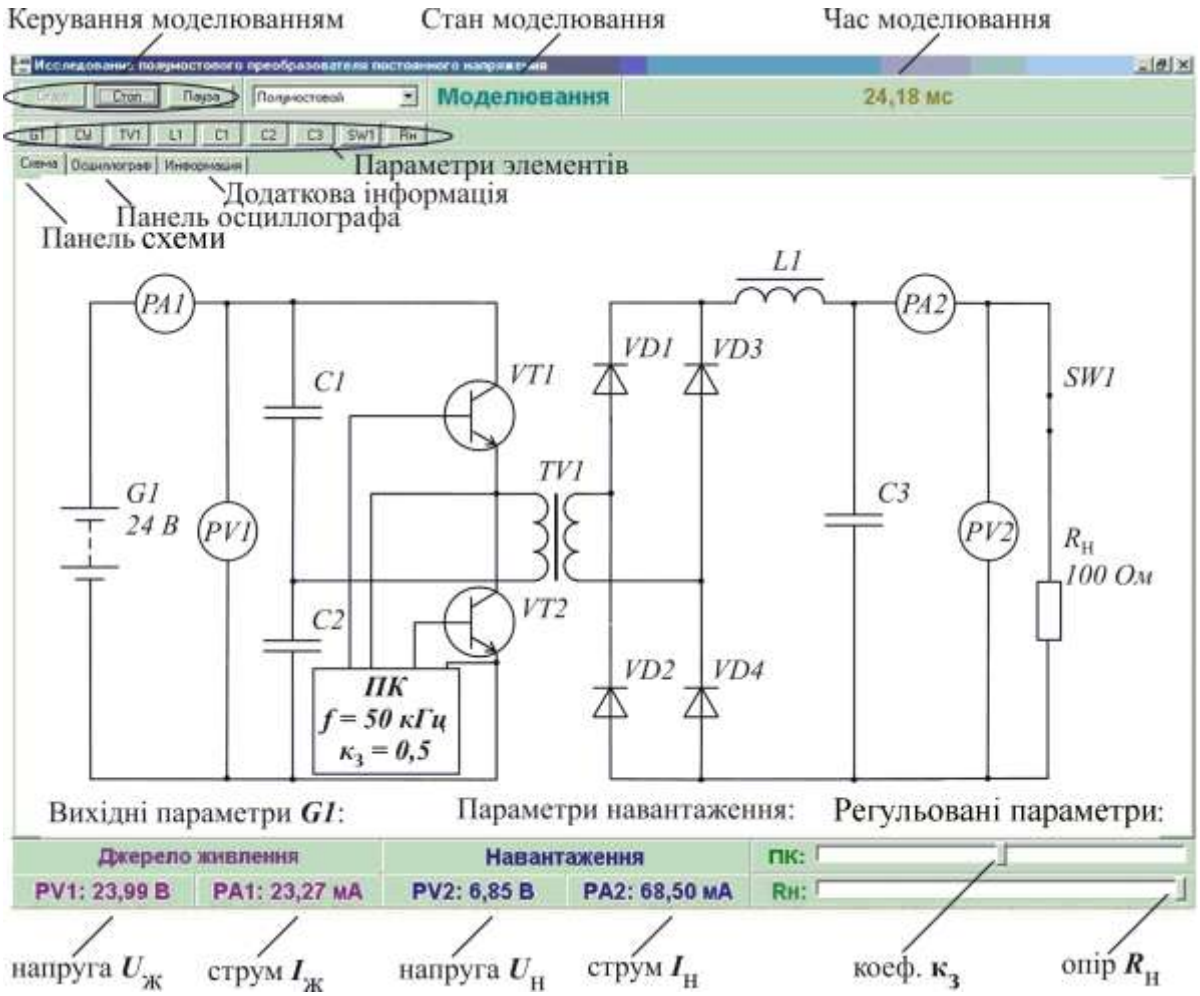


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

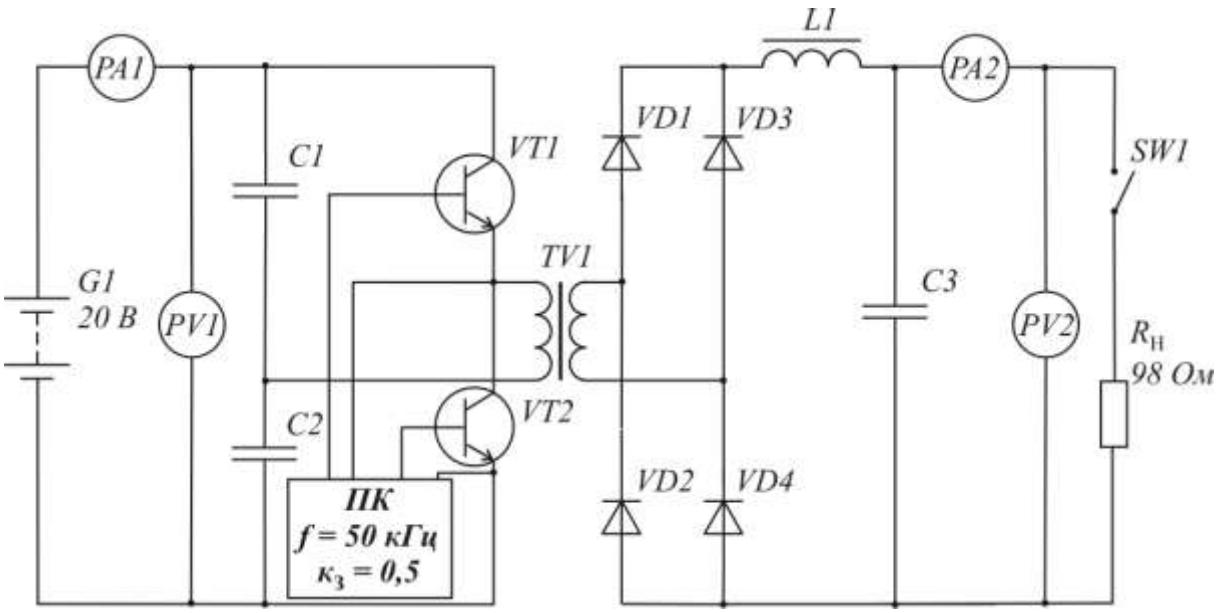


Рисунок 3.2 – Досліджувана схема

Лабораторний макет містить:

- джерело – генератор ***G1*** постійної напруги U_{G1};
- перетворювач постійної напруги, що містить елементи ***C1, C2, VT1, VT2, TV1, VD1…VD4, L1, C3***;
- опір $R_н$ навантаження перетворювача;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** напруги $U_ж$ на виході джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** струму $I_ж$, споживаного від джерела ***G1***;
- вольтметр ***PV2*** вихідної напруги $U_н$ перетворювача;
- амперметр ***PA2*** струму $I_н$ навантаження перетворювача;
- пристрій керування ***ПК*** перетворювачем.

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1***, перетворювача постійної напруги на змінну – інвертора (***C1***, ***C2***, ***VT1***, ***VT2***, ***TV1***), випрямного блока ***VD1…VD4***, згладжувального фільтра ***L1***, ***C3*** та опору навантаження $R_н$. Трансформатор ***TV1*** забезпечує потрібну амплітуду високочастотних імпульсів. Опір навантаження $R_н$ вимикається за допомогою вимикача ***SW1***. Інвертор керується за допомогою пристроя керування ***ПК***. Пристрій керування продукує імпульси, потрібні задля відкривання транзисторів, з урахуванням специфіки півмостової схеми. Список елементів макета подано в табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено коефіцієнт заповнювання $к_з$ імпульсів пристроя керування ***ПК*** та опір резистора навантаження $R_н$.

Середні значення напруги та струму джерела первинного електроживлення контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги $U_н = U_0$ та струму $I_н = I_0$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг та струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи пристроя керування ***ПК***. Тому тривалість розгортки проградуйовано у частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для збереження останнього періоду моделювання.

Опис пристрою керування

Пристрій керування являє собою багатоканальний контролер імпульсних сигналів з широтно-імпульсною модуляцією. На рис. 3.3 зображено вікно редагування параметрів пристрою керування. Список редагувальних параметрів можна поділити на дві категорії: спільні для всіх каналів й індивідуальні для кожного каналу.

У даній роботі використовування індивідуальних настроювань каналу не має значення, оскільки використовується всього один канал, призначений для роботи з двотактними схемами.

До загальних параметрів належать: частота роботи $f = f_{ПК} = f_{пр}$, коефіцієнт заповнювання $к_з$ та амплітуда вихідних імпульсів, кількість фаз, а також вид виходу (однотактний чи двотактний).

Індивідуально для кожного каналу настроюються зсув відносно початку періоду (у відсотках) та відносне змінювання ширини імпульсів (щодо ширини, установленої коефіцієнтом заповнювання). Кожен канал можна також індивідуально вимикати.

Таблиця 3.2 – **Склад лабораторного макета**

№ поз.	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело постійної напруги	Напруга	3	100	В	
		Внутрішній опір	0,01	1	Ом	
C1	Конденсатор	Ємність	100	470	мкФ	
C2	Конденсатор	Ємність	100	470	мкФ	
C3	Конденсатор	Ємність	1	470	мкФ	
VT1	Біполярний транзистор					n-p-n
VT2	Біполярний транзистор					n-p-n
TV1	Трансформатор	Коефіцієнт трансформації	0,5	2		
VD1	Діод					
VD2	Діод					
VD3	Діод					
VD4	Діод					
L1	Дросель	Індуктивність	1	1000	мкГн	
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Середнє значення
ПК	Пристрій керування	Коефіцієнт заповнювання	0,01	0,99		
		Частота роботи	1	1000	кГц	

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	Параметри електричних процесів
***ПК*, Вих 1**	Напруга $u_{к1}(t)$ на виході 1 пристрою керування ***ПК***
***ПК*, Вих 2**	Напруга $u_{к2}(t)$ на виході 2 пристрою керування ***ПК***
G1, U	Напруга $u_{ж}(t)$ на виході джерела живлення ***G1***
G1, I	Струм $i_{ж}(t)$, споживаний від джерела живлення ***G1***
C1, U	Напруга $u_{c1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{c1}(t)$ конденсатора ***C1***
C2, U	Напруга $u_{c2}(t)$ на конденсаторі ***C2***
C2, I	Струм $i_{c2}(t)$ конденсатора ***C2***
***VT1*, $U_{ке}$**	Напруга $u_{кVT1}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT1***
***VT1*, $I_{к}$**	Струм $i_{кVT1}(t)$ колектора ***VT1***
***VT2*, $U_{ке}$**	Напруга $u_{кVT2}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT2***
***VT2*, $I_{к}$**	Струм $i_{кVT2}(t)$ колектора ***VT2***
TV1, U1	Напруга $u_{W1}(t)$ на обмотці ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, I1	Струм $i_{W1}(t)$ обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, U2	Напруга $u_{W2}(t)$ на обмотці ***W2*** трансформатора ***TV1***
TV1, I2	Струм $i_{W2}(t)$ обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1***
L1, U	Напруга $u_{L1}(t)$ на дроселі ***L1***
L1, I	Струм $i_{L1}(t)$ дроселя ***L1***
C3, U	Напруга $u_{c3}(t)$ на конденсаторі ***C3***
C3, I	Струм $i_{c3}(t)$ конденсатора ***C3***
$R_{н}$, U	Напруга $u_{н}(t)$ на навантаженні
$R_{н}$, I	Струм $i_{н}(t)$ навантаження

4 Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови транзисторних перетворювачів постійної напруги;
- деякі особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів транзисторних перетворювачів постійної напруги;
- процеси функціонування у транзисторних перетворювачах постійної напруги із самозбудженням та з незалежним збудженням (з підсилювачем потужності);
- особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

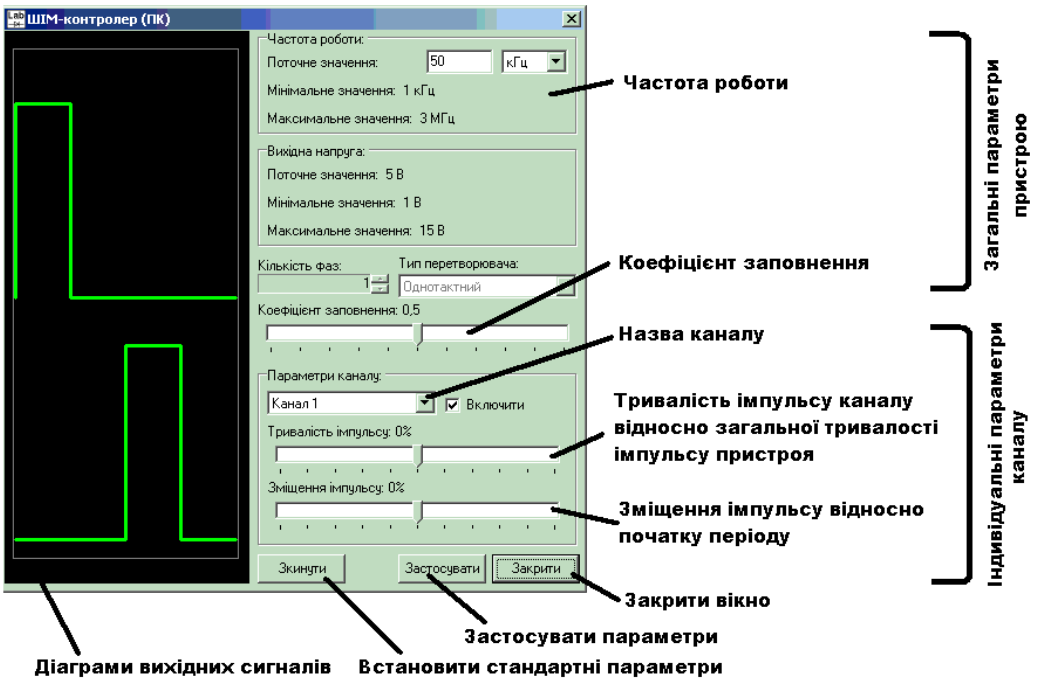


Рисунок 3.3 – Вікно редагування параметрів пристроя керування ***ПК***

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для подальшого виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача, мету кожного досліду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

5 Контрольні запитання

5.1 З яких функціональних вузлів складається напівпровідниковий перетворювач постійного струму з підсилювачем потужності і в чому полягає їхнє призначення?

5.2 Поясніть принцип дії (принципи перетворювання й принципи регулювання електричної енергії) напівпровідникового перетворювача з підсилювачем потужності.

5.3 Чому у транзисторних перетворювачах використовується прямокутна форма змінної напруги й від яких чинників залежить ця форма?

5.4 Що являє собою зовнішня (навантажувальна) характеристика транзисторного перетворювача? Поясніть її.

5.5 Чому транзисторні перетворювачі постійної напруги й струму мають відносно високий к.к.д.?

5.6 Які переваги й недоліки мають транзисторні перетворювачі постійної напруги й струму?

5.7 Де й для чого використовуються транзисторні перетворювачі електричної енергії (їхнє місце, призначення в апаратурі зв'язку)?

5.8 Зобразіть широко використовувані принципові схеми однотактних і двотактних перетворювачів електричної енергії. Охарактеризуйте переваги й недоліки кожної з наведених схем.

5.9 Поясніть призначення кожного елемента принципової електричної схеми. Поясніть фізичні процеси, що відбуваються в кожному з елементів (кількість розглянутих елементів може бути обмежено викладачем).

5.10 Зобразіть діаграми струмів та напруг у колах, елементах схеми, зазначених викладачем.

5.11 Які показники якості характеризують транзисторний перетворювач електричної енергії?

5.12 Розгляньте режим роботи силових комутуючих транзисторів макета перетворювача в нестабілізованому режимі, користуючись їхніми вихідними характеристиками.

5.13 Як впливає частота перетворювання на масогабаритні показники й к. к. д. перетворювача?

5.14 Область використовування півмостового перетворювача. Які практичні приклади використовування даної схеми ви знаєте?

5.15 Яку роль у схемі перетворювача виконує пристрій керування? Чи можна побудувати півмостовий перетворювач без пристрою керування?

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних перетворювачів постійної енергії, а також процеси їхнього функціонування.

6.2 Дослідити схему транзисторного перетворювача з підсилювачем потужності:

6.2.1 зняти зовнішню (навантажувальну) характеристику перетворювача;

6.2.2 визначити вихідний опір і відсоткове зниження вихідної напруги перетворювача;

6.2.3 визначити коефіцієнт корисної дії перетворювача;

6.2.4 експериментально визначити залежність змінювання частоти перетворювання перетворювача за змінювання струму навантаження;

6.2.5 дослідити регулювальну характеристику перетворювача;

6.2.6 дослідити процеси функціонування перетворювача:

- пульсації у вхідних та вихідних колах перетворювача;
- електричні процеси (струми й напруги) в елементах та колах перетворювача.

6.3 Сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехничної побудови транзисторних перетворювачів постійного струму та процеси їхнього функціонування за [2.1...2.5] і матеріалам даної лабораторної роботи. Вивчити особливості схемотехничного виконання лабораторного макета (див. розд. 3).

Одержати у викладача контрольні запитання щодо вивченого матеріалу й підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму та обсяг їхнього подання в звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для виконання роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторного макета.

7.2 До пункту 6.2. Дослідження транзисторного перетворювача постійного струму з підсиленням потужності.

Для забезпечення потрібних параметрів елементів схеми та режимів роботи досліджуваних перетворювачів може бути використано кнопки швидкого доступу ***"G1", "ПК", "L1", "C1", "C2","C3", "$R_н$", "SW1"*** (рис. 3.1).

7.2.1 До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішньої (навантажувальної) характеристики перетворювача.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на навантаженні $U_н$ від струму $I_н$, $U_н = f(I_н)$. При знятті зовнішньої характеристики значення коефіцієнта заповнювання **кз** пристрою керування задає викладач.

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму навантаження 5...7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $I_ж$, $U_ж$, $U_н$, $T_{пр}$. Задані значення занести до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані				
	$I_н$, А	$U_н$, В	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$T_{пер}$, с	$P_ж$, Вт	$P_н$, Вт	$f_{пер}$, Гц	$r_{пер}$, Ом	η, %
1										
2										
…										

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напруга $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, внутрішній опір $r_1 = r_{1\ ном}$);
- відредагувати параметри дроселя ***L1***: установити значення індуктивності дроселя $L1 = L1_{ном}$;
- відредагувати параметри пристроя керування ***ПК***: установити потрібні значення частоти $f_{ПК}$ та коефіцієнта $к_з$ заповнювання;
- відредагувати параметри конденсаторів ***C1, C2, C3*** – значення ємності відповідно $C1_{ном}$, $C2_{ном}$, $C3_{ном}$;
- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”;**
- зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2***: відповідно напруга $U_ж$ і на виході джерела ***G1,*** $U_{н\ нс}$ – напруга ненавантаженого стану на виході перетворювача. Результат занести до табл. 7.1;
- підімкнути опір $R_н$ навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- змінюючи опір $R_н$ навантаження (використовуючи повзунка “$R_н$” – див. рис. 3.1, правий нижній кут) від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом) зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2***: відповідно напруга $U_ж$ на виході джерела ***G1,*** $U_н$ – напруга в колі навантаження перетворювача; амперметрів ***PA1, PA2*** – відповідно струм $I_ж$, споживаний від джерела ***G1***, і струм $I_н$ у колі навантаження перетворювача. Результати занести до табл. 7.1;
- за результатами дослідження побудувати зовнішню характеристику, виконати розрахункову частину й заповнити табл. 7.1.

7.2.2 До пункту 6.2.2 Визначення вихідного опору перетворювача.

Вихідний опір перетворювача визначається за формулою

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н = (U_{н\ max} - U_н)/(I_{н\ max} - I_н),$$

де $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги перетворювача при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\ нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\ ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\ нс} - U_{н\ ном}}{U_{н\ нс}} \cdot 100\% .$$

До пункту 6.2.3. Визначення коефіцієнта корисної дії перетворювача.

Коефіцієнт корисної дії перетворювача визначається через значення потужностей на його виході $P_н$ ($P_н = I_н U_н$) і на вході $P_ж$ ($P_ж = I_ж U_ж$):

$$\eta = P_н / P_ж$$

До пункту 6.2.5. Експериментальне визначення частоти перетворювання.

Експериментальне значення робочої частоти перетворювача визначається з осцилограми $u_{W1}(t)$ (*TV1, U1* – відповідно до табл. 3.3) або $u_{W2}(t)$ (*TV1, U2*). Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду $T_{пр}$ кривої, яка спостерігається, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал визначається добутком **l n** двох величин: довжини **l** вимірюваного інтервалу часу на екрані по горизонталі у поділках і значення n величини часу на поділку у даному положенні перемикача "Час/Поділка". У даному разі

$$f_{пер} = 1/T_{пер} = 1/(l \cdot n).$$

До пункту 6.2.5. Побудова регулювальної характеристики перетворювача.

Регулювальна характеристика – це залежність вихідної напруги від коефіцієнта заповнювання пристрою керування $U_н = f(к_з)$. При знятті характеристики величина опору $R_н$ навантаження перетворювача узгоджується з викладачем. Для зняття регулювальних характеристик слід виконати таке:

- відредагувати параметри джерела *G1* (напруга $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, внутрішній опір $r_1 = r_{1\ ном}$);
- відредагувати параметри дроселя *L1*: установити значення індуктивності первинної обмотки *W1* дроселя $L1 = L1_{ном}$;
- відредагувати (див. рис. 3.1) параметри пристроя керування *ПК*: установити потрібні значення частоти $f_{ПК}$ та коефіцієнта $к_з$ заповнювання;
- відредагувати параметри конденсаторів *C1, C2, C3* – значення ємності відповідно $C1_{ном}$, $C2_{ном}$, $C3_{ном}$;
- установити потрібний опір $R_н$ навантаження $R_н = R_{н\ ном}$;
- установити мінімальне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”**;
- змінюючи коефіцієнт $к_з$ заповнювання (використовуючи повзунка $к_з$ пристрою керування *ПК* – див. рис. 3.1, правий нижній кут), зняти регулювальну характеристику. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – **Результати вимірювань**

$к_з$	**0,01**	**0,1**	**0,25**	**0,5**	**0,75**	**0,9**	**0,99**
$U_н$, **В**							

7.2.6. До пункту 6.2.6. Дослідження процесів функціонування перетворювача.

Осцилограми величин, які спостерігаються, слід зображувати на інтервалі 1,5…2 періоди. Вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів постійного струму з урахуванням постійної складової (окрім випадків дослідження змінних складових, наприклад напруги $u_ж(t)$ на вході, напруги $u_Н(t)$ на виході перетворювача, напруг $u_{с1}(t)$, $u_{с2}(t)$, $u_{с3}(t)$, **…**). При зображуванні осцилограм слід правильно зазначати вісь часу. Змінюючи опір $R_н$ реостата, встановити номінальне значення струму навантаження $I_н = I_{н\ ном}$. Спостерігати й відбити змінювання форми діаграм в осцилограмах за струмів навантаження $I_{н\ ном}$ та $0{,}5I_{н\ ном}$, зберігаючи їхні амплітудні й часові співвідношення.

Дослідження пульсацій у вхідних та вихідних колах перетворювачів

Методика дослідження пульсацій у вхідних та вихідних колах імпульсних перетворювачів припускає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до табл. 7.3):

- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напруга $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, вихідний опір $r_1 = r_{1\ ном}$);
- відредагувати параметри пристроя керування ***ПК*** (див. рис. 3.1):
- установити потрібну частоту $f = f_{ПК}$ роботи схеми ***ПК***;
- установити потрібне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання вихідних напруг $u_{к1}(t)$, $u_{к2}(t)$ пристрою керування ***ПК***;
- установити опір $R_н = R_{ном}$ (відповідно $I_н = I_{н\ ном}$) у колі навантаження перетворювача, використовуючи повзунка "$R_н$" (див. рис. 3.1);
- відредагувати параметри елементів ***L1***, ***C1,*** використовуючи кнопки відповідно "***L1***", "***C1***" на панелі елементів (див. рис. 3.1), установивши їхні номінальні значення $L1_{ном}$, $C1_{ном}$;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт"** (див. рис. 3.1);
- зняти покази вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2***. Результати вимірювань $U_ж$, $U_н$ та $I_ж$, $I_н$ занести до табл. 7.3;
- виміряти розмах $\Delta U_{ж\sim}$ і частоту $f_{жu}$ пульсації напруги в колі живлення у вхідному колі перетворювача за осцилограмою напруги $u_ж(t)$ (***G1, U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{ж\sim}$ пульсації струму в колі живлення у вхідному колі перетворювача за осцилограмою $i_ж(t)$ (***G1, I***);

- виміряти розмах $\Delta U_{н\sim}$ і частоту $f_{ни}$ пульсації напруги в колі навантаження перетворювача за осцилограмою напруги $u_н(t)$ (контрольна точка ***R1, U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{н\sim}$ пульсації струму у вихідному колі перетворювача за осцилограмами $i_1(t)$ (відповідно ***L1, I*** – див. табл. 3.3);
- виміряти $\Delta I_{R\sim}$ пульсації струму в опорі $R_н$ за осцилограмою струму $i_н(t)$ (***R1, I –*** табл. 3.3);
- дослідження з даної методики виконати для перетворювача за різних значень індуктивності дроселя ***L1*** (***L1* = var,** наприклад, ***L1* = 1,5*L1*$_{ном}$, 0,5*L1*$_{ном}$, …**) – результати досліджень занести до табл. 7.3;

Використовуючи результати експерименту (див. табл. 7.3), розрахувати й заповнити таблицю 7.4 з урахуванням наведених далі співвідношень.

Результати експерименту дозволяють визначити коефіцієнти пульсацій і нормовані частоти:

$$\overline{f}_{жи} = f_{жи} / f_{ПК}; \quad \overline{f}_{ни} = f_{ни} / f_{ПК} \quad .$$

Коефіцієнти пульсацій на вході (струму $K_{пж}$ та напруги $K_{пжU}$), на виході (струму $K_{пн}$ і напруги $K_{пнU}$), у колі навантаження (струму $K_{пнR}$) перетворювача розраховуються у вигляді

$$K_{пж} = \frac{\Delta I_{ж\sim}}{2I_ж}; \quad K_{пн} = \frac{\Delta I_{н\sim}}{2I_н}, K_{пнR} = \frac{\Delta I_{R\sim}}{2I_н};$$

$$K_{пжU} = \frac{\Delta U_{ж\sim}}{2U_ж}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{н\sim}}{2U_н}.$$

Таблиця 7.3 – **Результати досліджень**

№ п/п	Експериментальна частина												
	***L1*, мкГн**	**$I_н$, А**	**$I_ж$, А**	**$U_ж$, В**	**$U_н$, В**	**$R_н$, Ом**	**$f_{жи}$, кГц**	**$\Delta U_{ж\sim}$, В**	**$\Delta I_{ж\sim}$, А**	**$f_{ни}$, кГц**	**$\Delta U_{н\sim}$, В**	**$\Delta I_{н\sim}$, А**	**$\Delta I_{R\sim}$, А**
1 2 …													

Таблиця 7.4 – **Результати розрахунків**

№ п/п	Розрахункові дані						
	$\overline{f}_{ви}$	$\overline{f}_{ни}$	$K_{пж}$	$K_{пжU}$	$K_{пн}$	$K_{пнU}$	$K_{пнR}$
1 2 …							

Дослідження електричних процесів перетворювачів

Спостерігати й зарисувати осцилограми електричних процесів в елементах та колах перетворювача відповідно до табл. 3.3.

Діаграми слід зобразити в одному масштабі за горизонталлю.

Вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів постійного струму з урахуванням постійної складової (змінні складові напруг $u_{C2}(t)$ та $u_н(t)$ досліджуються без урахування постійної складової). При зображуванні осцилограм слід правильно зазначити вісь часу. Змінюючи опір $R_н$ реостата, встановити максимальне значення струму навантаження. Спостерігати й відбити в попередніх осцилограмах змінювання форми діаграм.

7.3 До пункту 6.3. Висновки за результатами роботи. Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даної лабораторної роботи.

Висновки з виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, в яких розкрито сутність спостережуваних явищ чи здобуваних графічних залежностей. Висновки повинні не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, пояснюючи принципову відмінність одного випадку від іншого (наприклад сталість робочої частоти перетворювача із зовнішнім самозбудженням за змінювання струму навантаження й т. д).

8 Зміст звіту

Звіт повинен містити:

8.1 принципову схему перетворювача із зовнішнім збудженням;

8.2 таблиці вимірювань та обчислень;

8.3 графіки робочих характеристик перетворювачів

$$K_{пж}, K_{пжU}, K_{пн}, K_{пнU}, K_{пнR} = f(L1);$$

$$U_н, P_н, r_{пер}, \eta, f_{пер} = f(R_н);$$

$$U_н = f(к_З).$$

виконані в єдиній координатній системі;

8.4 осцилограми вихідної змінної напруги, а також осцилограми досліджених напруг та струмів елементів перетворювача;

8.5 висновки з аналізу досліджених характеристик перетворювача.

Лабораторна робота № 2.4
Дослідження тиристорного інвертора

1 Мета роботи

Вивчення принципі функціонування інверторів, експериментальне дослідження двотактного тиристорного інвертора напруги. Дослідження зовнішньої характеристики інвертора, особливості його схемотехнічної реалізації.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева – М.: Радио и связь, 1998. – С.46-68, С. 163–197.

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др. Электропитание устройств связи. –М.: Радио и связь, 1981. – С. 139–224.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986 – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др. Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975 – С. 217- 213.

3 Опис лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження тиристорного інвертора.

У макеті розміщено тільки одну досліджувану схему. Її стислий опис наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваної схеми**

№ п/п	Позначення в макеті	Опис	№ рис.
1	Тиристорний інвертор	Тиристорний інвертор, який працює на частоті 50 Гц	3.2

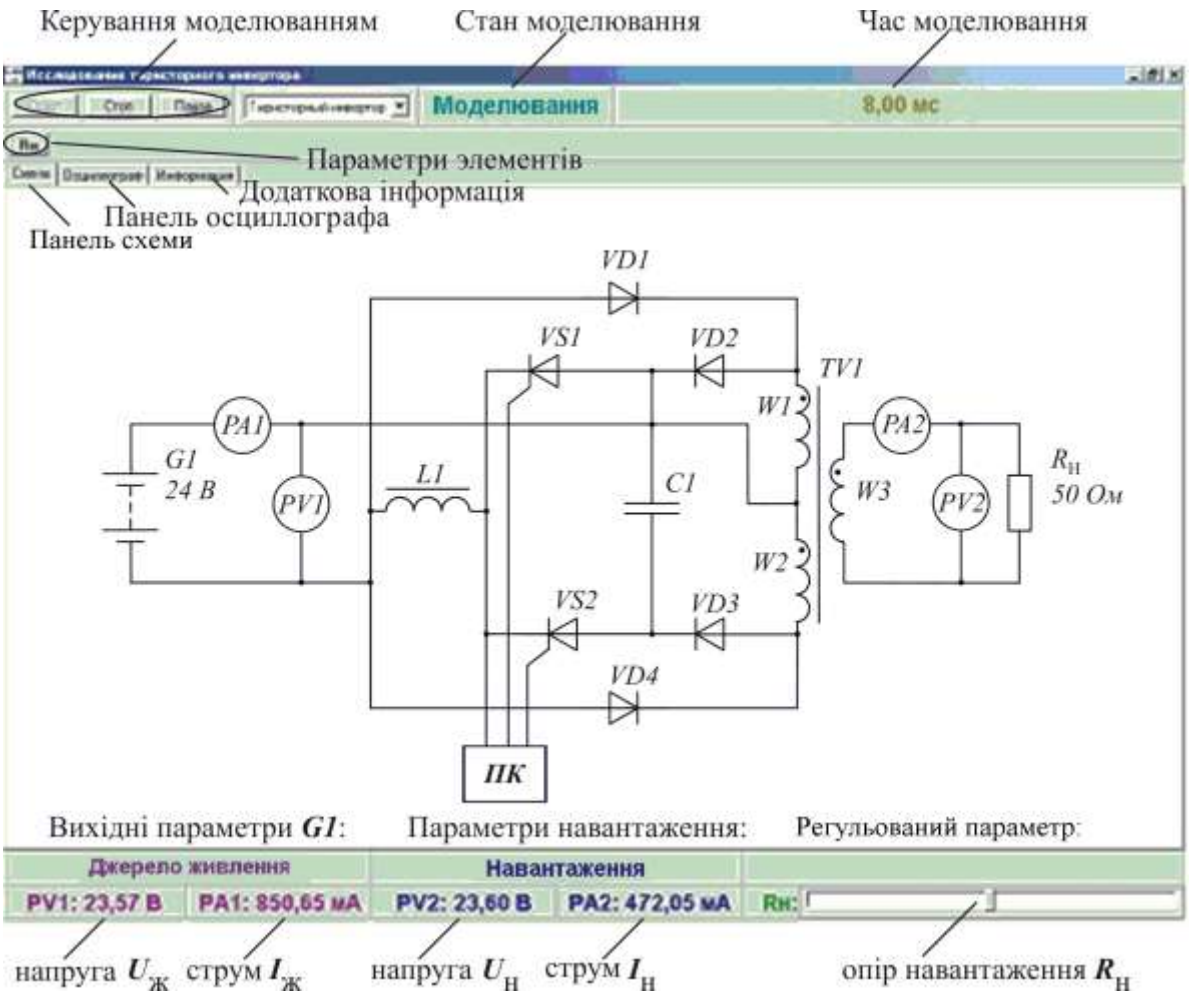


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

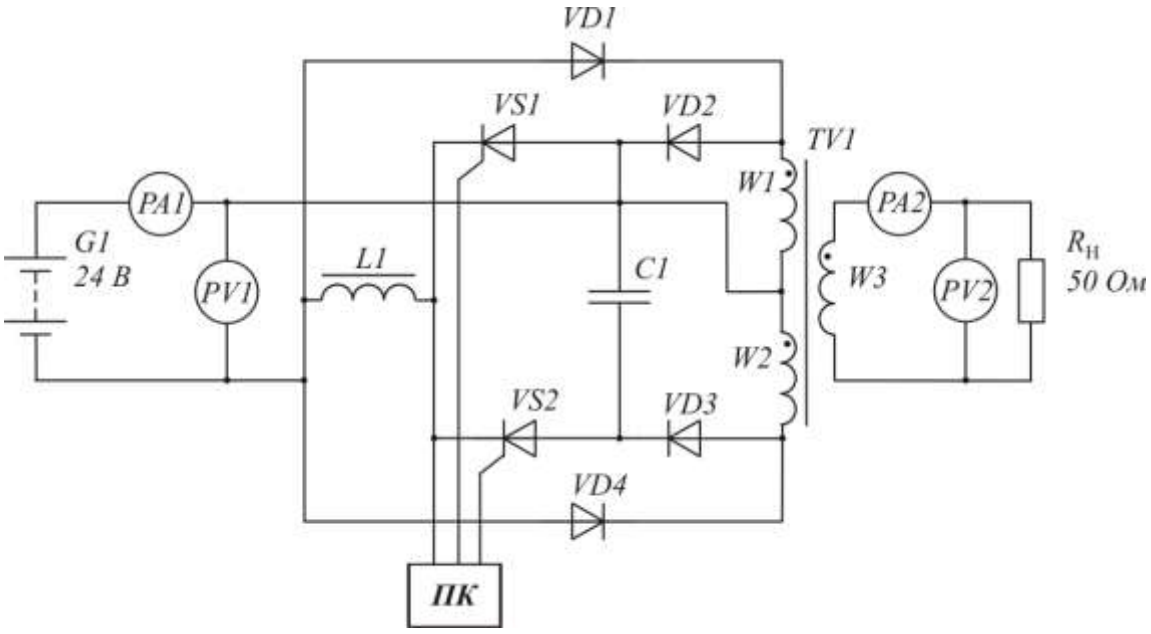


Рисунок 3.2 – Досліджувана схема

Лабораторний макет містить:

- джерело ***G1*** постійної напруги U_{G1};
- тиристорний інвертор, утворений елементами ***VS1, VS2, VD1…VD4, L1, C1, TV1***;
- пристрій керування ***ПК*** інвертором;
- опір $R_н$ навантаження інвертора;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** вихідної напруги $U_ж$ джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** струму $I_ж$, споживаного від джерела живлення ***G1***;
- вольтметр ***PV2*** вихідної напруги інвертора – напруги $U_н$ у колі навантаження;
- амперметр ***PA2*** струму $I_н$ навантаження.

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1***, перетворювача постійної напруги на змінну – інвертора (***C1***, ***VS1***, ***VS2***, ***VD1…VD4***, ***L1***, ***TV1***) та опору навантаження $R_н$. Інвертор скеровується за допомогою пристрою керування ***ПК***. Пристрій керування продукує імпульси, потрібні для відкривання тиристорів, з урахуванням специфіки схеми. Список елементів макета подано в табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено опір резистора навантаження $R_н$.

Таблиця 3.2 – **Склад лабораторного макета**

№ поз.	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		Параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело постійної напруги					
C1	Конденсатор					
VS1	Тиристор					
VS2	Тиристор					
TV1	Трансформатор					
VD1	Діод					
VD2	Діод					
VD3	Діод					
VD4	Діод					
L1	Дросель					
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Діюче значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Діюче значення
ПК	Пристрій керування					

Середні значення напруги й струму джерела первинного електроживлення контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Діючі значення напруги $U_н$ та струму $I_н$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг та струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи пристрою керування ***ПК***. Тому тривалість розгортки проградуйовано в частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список досліджуваних параметрів і контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.3 Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	**Параметри електричних процесів**
***ПК*, Вих 1**	Напруга $u_{к1}(t)$ на виході 1 пристрою керування ***ПК***
***ПК*, Вих 2**	Напруга $u_{к2}(t)$ на виході 2 пристрою керування ***ПК***
G1, U	Напруга $u_ж(t)$ на виході джерела живлення ***G1***
G1, I	Струм $i_ж(t)$, споживаний від джерела живлення ***G1***
***TV1*, Магн. потік**	Магнітний потік $Ф_0(t)$ трансформатора ***TV1***
TV1, U1	Напруга $u_{W1}(t)$ на обмотці ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, I1	Струм $i_{W1}(t)$ обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, U2	Напруга $u_{W2}(t)$ на обмотці ***W2*** трансформатора ***TV1***
TV1, I2	Струм $i_{W2}(t)$ обмотки ***W2*** трансформатора ***TV1***
TV1, U3	Напруга $u_{W3}(t)$ на обмотці ***W3*** трансформатора ***TV1***
TV1, I3	Струм $i_{W3}(t)$ обмотки ***W3*** трансформатора ***TV1***
VS1, $U_{ка}$	Напруга $u_{VS1}(t)$ катод–анод тиристора ***VS1***
VS1, $I_а$	Струм $i_{VS1}(t)$ анода тиристора ***VS1***
VS2, $U_{ка}$	Напруга $u_{VS2}(t)$ катод–анод тиристора ***VS2***
VS2, $I_а$	Струм $i_{VS2}(t)$ анода тиристора ***VS2***
VD2, U	Напруга $u_{VD2}(t)$ катод–анод діода ***VD2***
VD2, I	Струм $i_{VD2}(t)$ діода ***VD2***
VD3, U	Напруга $u_{VD3}(t)$ катод–анод діода ***VD3***
VD3, I	Струм $i_{VD3}(t)$ діода ***VD3***
$R_н$, U	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні інвертора
$R_н$, I	Струм $i_н(t)$ навантаження

4 Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови тиристорних перетворювачів постійної напруги;
- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів тиристорних перетворювачів постійної напруги;
- процеси функціонування тиристорних перетворювачів постійної напруги; особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для виконання лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача, мету кожного досліду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні запитання

5.1 З яких функціональних вузлів складається інвертор і в чому полягає їхнє призначення?

5.2 Де й для чого використовуються інвертори (їхнє місце, призначення, області застосовування)?

5.3 Зобразіть схеми однофазних однотактних інверторів. Назвіть переваги й недоліки кожної з наведених схем.

5.4 Зобразіть схеми двотактних інверторів. Назвіть їхні переваги й недоліки.

5.5 Поясніть особливості схемотехнічної реалізації й функціонування однотактних інверторів.

5.6 Поясніть особливості схемотехнічної реалізації й функціонування двотактних інверторів.

5.7 Поясніть особливості функціонування однотактних і двотактних інверторів з використанням транзисторів та тиристорів у якості силових комутуючих елементів. Назвіть їхні переваги й недоліки.

5.8 Поясніть особливості технічної реалізації та електромагнітних процесів інверторів напруги та струму.

5.9 Зобразіть діаграми струмів та напруг елементів та кіл схеми інвертора, досліджуваного в даній роботі.

5.10 Приведіть класифікацію інверторів. Які їхні класифікаційні ознаки найчастіш використовуються?

5.11 Поясніть призначення кожного з елементів досліджуваної схеми інвертора, а також фізичні процеси, що відбуваються в кожному з елементів.

5.12 Яку роль у схемі інвертора виконує пристрій керування? Чи можлива технічна реалізація інвертора без пристроя керування?

5.13 Що являє собою зовнішня (навантажувальна) характеристика інвертора? Поясніть її.

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних та тиристорних перетворювачів постійної енергії, а також процеси їхнього функціонування.

6.2 Дослідити схему тиристорного інвертора напруги:

6.2.1 зняти зовнішню (навантажувальну) характеристику інвертора;

6.2.2 визначити вихідний опір та відсоткове зниження вихідної напруги інвертора;

6.2.3 визначити коефіцієнт корисної дії інвертора;

6.2.4 експериментально визначити залежність змінювання частоти перетворювання інвертора за змінювання струму навантаження;

6.2.5 дослідити процеси функціонування інвертора.

6.3 Сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань. Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних та тиристорних інверторів і процеси їхнього функціонування за [2.1...2.5] і матеріалами даної лабораторної роботи. Вивчити особливості схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд. 3).

Одержати у викладача контрольні запитання щодо вивченого матеріалу і підготувати відповіді. Уточнити у викладача форму й обсяг подання відповідей у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для виконування роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторного макета.

7.2 До пункту 6.2. Дослідження двотактного тиристорного інвертора напруги.

7.2.1. До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішньої (навантажувальної) характеристики інвертора.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги навантаження $U_н$ від струму $I_н$, $U_н = f(I_н)$.

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму навантаження 5...7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $I_ж$, $U_ж$, $U_н$, $T_{пр}$. Здобуті значення занести в таблицю 7.1.

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”;**
- змінюючи опір $R_н$ навантаження від мінімуму (максимуму) до максимуму (мінімуму) (наприклад $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти зовнішню характеристику, фіксуючи покази вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2*** . Результат занести до табл. 7.1;
- за результатами дослідження побудувати зовнішню характеристику.

Таблиця 7.1 – **Результати досліджень**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані				
	$I_н$, А	$U_н$, В	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$T_{пер}$, с	$P_ж$, Вт	$P_н$, Вт	$f_{пер}$, Гц	$r_{пер}$, Ом	η, %
1										
2										
…										

7.2.2 До пункту 6.2. 2. Визначення вихідного опору й відсоткового зниження вихідної напруги інвертора.

Вихідний опір інвертора визначається за результатами вимірювань п. 7.2.1 (див. табл. 7.1) за формулою

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н = (U_{н\,max} - U_н)/(I_{н\,max} - I_н),$$

$U_{н\,max}$, $I_{н\,max}$ – максимальні значення відповідно напруги та струму навантаження.

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги інвертора при переході від максимальної напруги $U_{н\,max}$ до номінального навантаження з вхідною напругою $U_{н\,ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\,max} - U_{н\,ном}}{U_{н\,max}} \cdot 100\% .$$

7.2.3 До пункту 6.2.3. Визначення коефіцієнта корисної дії перетворювача.

Коефіцієнт корисної дії інвертора визначається з урахуванням здобутих (див. табл. 7.1) результатів через значення потужностей на його виході $P_н$ ($P_н = I_н U_н$) і на вході $P_ж$ ($P_ж = I_ж U_ж$):

$$\eta = P_н / P_ж$$

7.2.4 До пункту 6.2.4. Експериментальне визначення частоти інвертора.

Експериментальне значення робочої частоти перетворювача визначається за осцилограмою $u_{W3}(t)$ (*TV1*, *U3* – відповідно до табл. 3.1). Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду $T_{пер}$ кривої, яка спостерігається, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний інтервал $T_{пер}$ визначається добутком ($T_{пер} = nl$) двох величин: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю в поділках (кількість поділок (клітин) за період $T_{пер}$) і значення величини часу на поділку у певному положенні перемикача **"Час/Поділка"** (масштаб частоти осцилографа мкс/поділ, мс/поділ, …). Відповідно частота перетворювання визначається як

$$f_{пер} = 1/T_{пер} = 1/(l \cdot n).$$

7.2.5. До пункту 6.2.5. Дослідження процесів функціонування перетворювача.

Осцилограми величин, які спостерігаються, слід зображувати на інтервалі 1,5…2 періоди, зберігаючи їхні амплітудні й часові співвідношення. Спостерігати й зарисувати осцилограми електричних процесів в елементах і колах інвертора слід відповідно до табл. 3.3.

Діаграми треба креслити в одному масштабі за горизонталлю.

Вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів постійного струму с урахуванням постійної складової. Для напруги $u_ж(t)$ на виході джерела живлення *G1* і струму $i_ж(t)$, який споживається від джерела живлення *G1*, слід додатково навести осцилограми їхніх змінних складових (при цьому вхід осцилографа має бути перемкнено на приймання сигналів змінного струму без урахування постійної складової). При зображуванні осцилограм слід правильно зазначати вісь часу. Змінюючи опір $R_н$ реостата, установити максимальне значення струму навантаження. Спостерігати відповідно до табл. 3.3 і відбити в попередніх осцилограмах змінювання форми діаграм за струмів навантаження $I_н = I_{н\,ном}$ та

$$I_н = 0{,}5\, I_{н\,ном}.$$

7.3 До пункту 6.3. Висновки за результатами роботи. Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даної методичної розробки.

Висновки щодо виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, в яких розкрито сутність спостережуваних явищ чи здобуваних графічних залежностей. Висновки повинні не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, пояснюючи принципову відмінність одного випадку від іншого.

8 Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципову схему інвертора;

8.2 таблиці вимірювань та обчислень;

8.3 графіки робочих характеристик перетворювача

$$U_{н}, P_{н}, \eta, r_{пер}, f_{пер} = f(I_{н}).$$

виконані в єдиній координатній системі;

8.4 осцилограми вихідної змінної напруги, а також осцилограми досліджуваних напруг та струмів елементів перетворювача відповідно до табл. 3.3;

8.5 висновки щодо аналізу досліджуваних характеристик інвертора.

Лабораторна робота № 2.5
Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги

1 Мета роботи

Вивчення принципів функціональної, схемотехнічної побудови та функціонування напівпровідникових стабілізаторів постійної напруги з неперервним регулюванням.

Освоєння методики експериментального визначення головних характеристик, показників якості стабілізаторів постійної напруги. Експериментальне дослідження їхніх параметрів і характеристик.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.: Радио и связь, 1998. – С. 130 – 162.

2.2 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / О.А. Доморацкий и др.; – М.: Радио и связь, 1981. С.171–220.

2.3 Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель и др.; Под ред. Г.С. Найвельта – М.: Радио и связь, 1986. – С. 166 – 176.

2.4 Китаев В.Е. и др.; Электропитание устройств связи. – М.: Связь, 1975. – С. 177–216.

2.5 Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – М. Высшая школа, 1991. С. 144 –207.

3 Опис лабораторного макета

Склад і можливості лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження компенсаційних стабілізаторів напруги.

У табл. 3.1 наведено стислий опис чотирьох варіантів k (k = 1, 2, 3, 4) схем, які містяться в лабораторному макеті.

Лабораторний макет містить:

- джерело – генератор ***G1*** змінної напруги;
- регульоване джерело живлення ***РДЖ***, яке містить трансформатор ***TV1***, тиристорний випрямляч зі згладжувальним фільтром та пристроєм керування, утворений елементами ***VS1, VS2, C1, ПК*** – пристрій керування;
- чотири схеми компенсаційних стабілізаторів;
- опір $R_н$ навантаження стабілізатора;

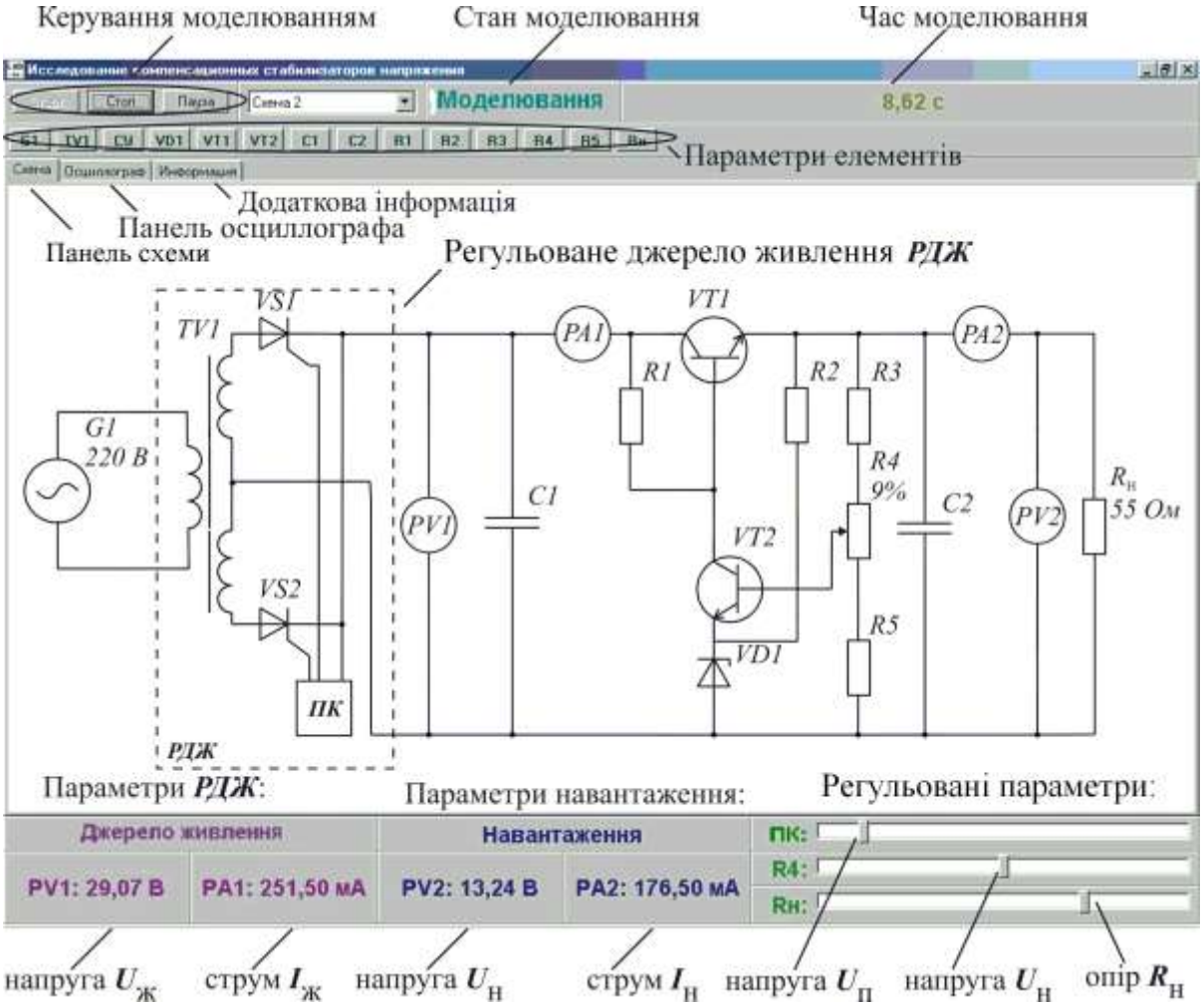


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваних схем**

k	**Позначення в макеті**	**Опис**	**№ рис.**
1	Схема 1	Компенсаційний стабілізатор з активним колекторним навантаженням підсилювача постійного струму	3.2
2	Схема 2	Компенсаційний стабілізатор зі стабілізатором струму в колі колектора підсилювача постійного струму	3.3
3	Схема 3	Компенсаційний стабілізатор з живленням підсилювача постійного струму від окремого джерела постійної напруги	3.4
4	Схема 4	Компенсаційний стабілізатор, виконаний на інтегральній мікросхемі КР142ЕН8Б	3.5

- двоканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** вихідної напруги $\boldsymbol{U_ж}$ регульованого джерела живлення ***РДЖ***;
- амперметр ***PA1*** струму $\boldsymbol{I_ж}$, споживаного від джерела живлення ***РДЖ***;
- вольтметр ***PV2*** вихідної напруги – напруги $\boldsymbol{U_н}$ кола навантаження $\boldsymbol{R_н}$;
- амперметр ***PA2*** струму $\boldsymbol{I_н}$ навантаження стабілізатора.

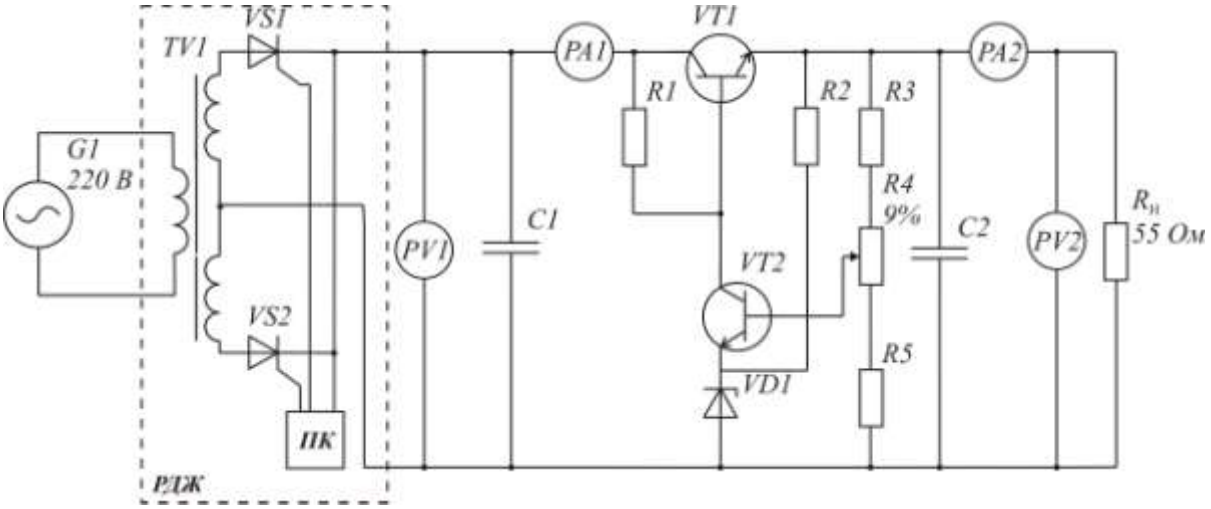


Рисунок 3.2 – Стабілізатор з активним колекторним навантаженням підсилювача постійного струму ($\boldsymbol{k}$ = 1)

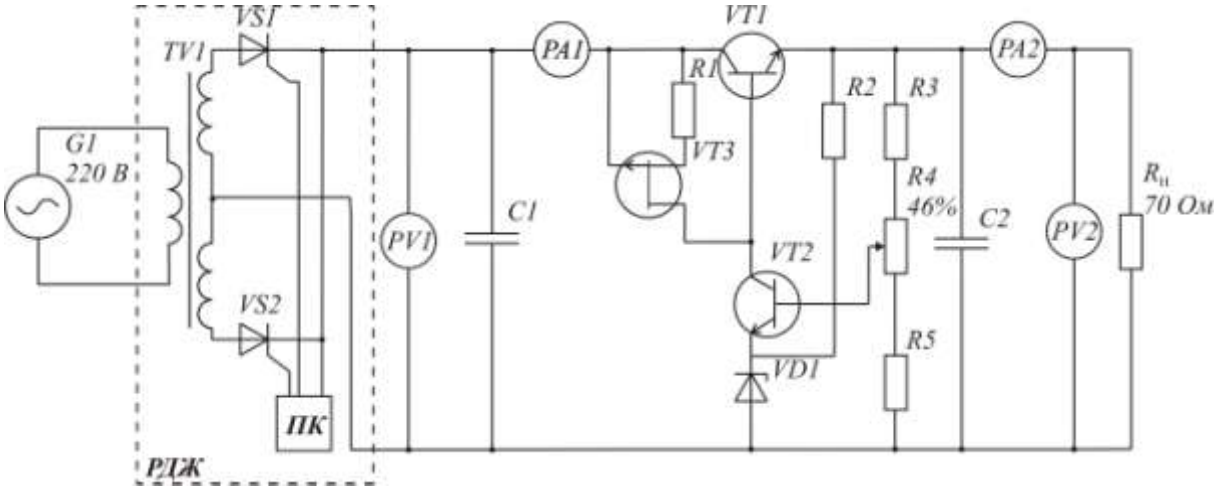


Рисунок 3.3 – Стабілізатор зі стабілізатором струму в колекторному колі підсилювача постійного струму ($\boldsymbol{k}$ = 2)

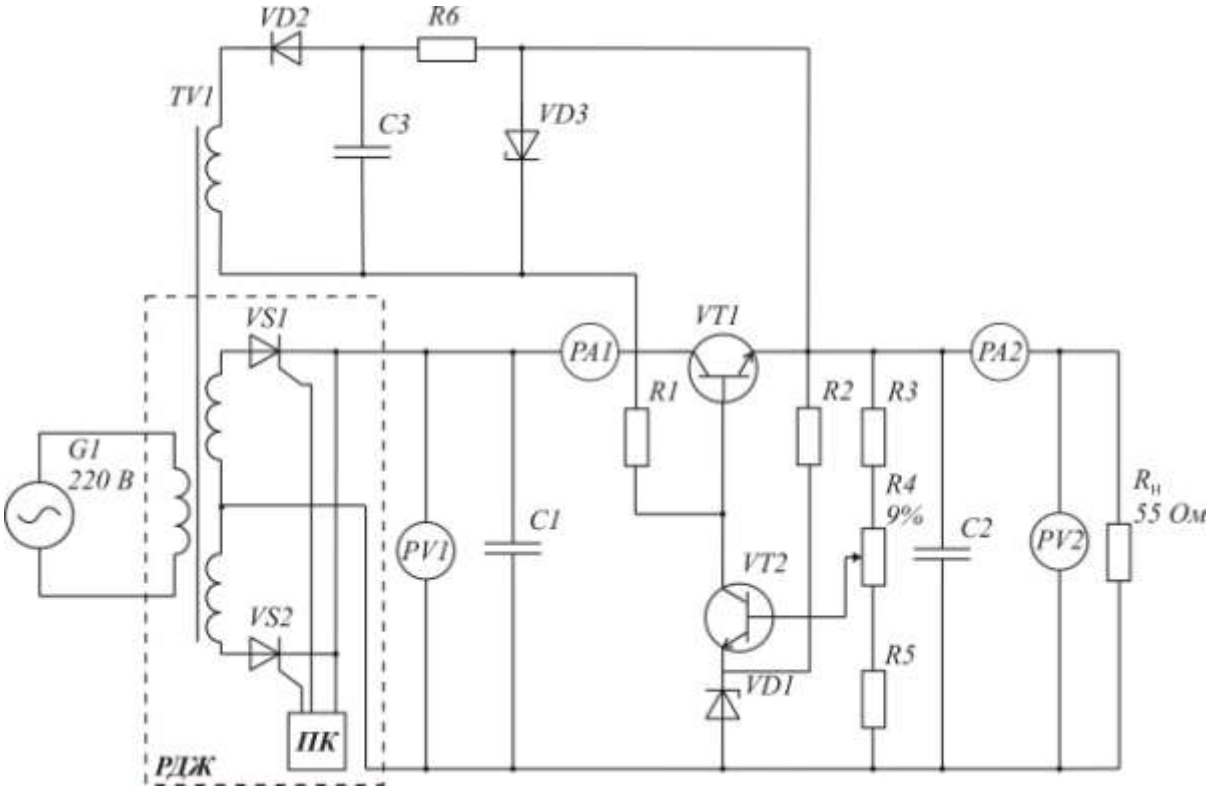


Рисунок 3.4 – Стабілізатор з живленням підсилювача постійного струму від окремого джерела (***k*** = 3)

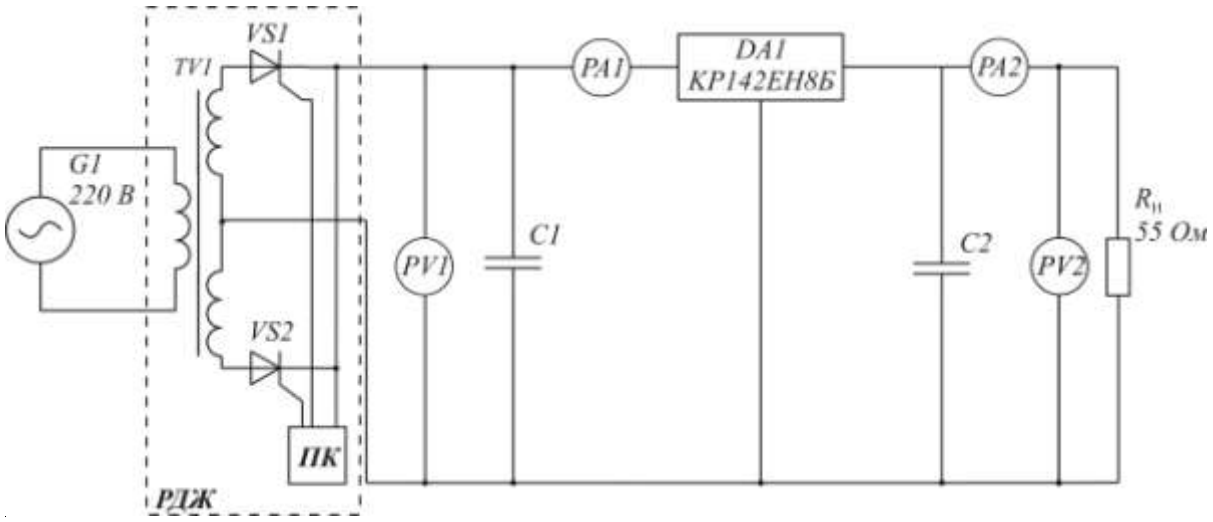


Рисунок 3.5 – Інтегральний стабілізатор (***k*** = 4)

Лабораторний макет складається з джерела первинного електроживлення ***G1***, трансформатора ***TV1***, що забезпечує узгодження напруг джерела первинного електроживлення й навантаження, керованого тиристорного випрямляча (***VS1***, ***VS2***), згладжувального фільтра ***C1***, компенсаційного

стабілізатора напруги й опору навантаження $R_н$. Тиристори випрямляча скеровуються імпульсами від пристроя керування ***ПК***.

Список елементів макета подано у табл. 3.2. Використовуючи опір навантаження $R_н$, потенціометр ***R4*** і пристрій керування ***ПК***, можна змінювати відповідно струм навантаження від $I_{н\ min}$ до $I_{н\ ном}$, напругу $U_н$ у колі навантаження від $U_{н\ min}$ до $U_{н\ max}$ і напругу $U_ж$ на вході стабілізатора від $U_{ж\ min}$ до $U_{ж\ max}$.

Середні значення напруги й струму на виході випрямляча контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги $U_н$ і струму $I_н$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також двоканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг та струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи джерела первинного електроживлення ***G1***. Тому тривалість розгортки проградуйовано в частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.2. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає задля зберігання останнього періоду моделювання.

Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити за рекомендованими літературними джерелами [2.1...2.5] функціональну й принципову схеми стабілізатора; процеси функціонування стабілізатора; особливості лабораторного макета (розділ 3); усвідомити призначення елементів схеми макета та їхню взаємодію.

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланк звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для подальшого виконування лабораторної роботи.

4.4 Відповісти на контрольні запитання, подати сподівані результати.

5 Контрольні запитання

5.1 Поясніть, у чому полягає компенсаційний метод стабілізації будь-якої електричної величини (наприклад напруги).

5.2 Зобразіть структурну схему компенсаційного стабілізатора напруги. Поясніть принципи роботи стабілізатора.

Таблиця 3.2 – **Склад лабораторного макета**

№ поз.	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело змінної напруги	Напруга	198	242	В	
		Частота	50	400	Гц	
TV1	Трансформатор	Коефіцієнт трансформації	7,5	22		
VD1	Стабілітрон	Напруга стабілізації	4,7	6,8	В	Тільки для схем 1...3
VD2	Діод					Тільки для схеми 3
VS1	Тиристор					
VS2	Тиристор					
VT1	Біполярний транзистор	Коефіцієнт підсилювання	10	100		Тільки для схем 1...3
VT2	Біполярний транзистор	Коефіцієнт підсилювання	10	100		Тільки для схем 1...3
VT3	Польовий транзистор					Тільки для схеми 3
DA1	Мікросхема КР142ЕН2Б					Тільки для схеми 4
C1	Конденсатор	Ємність	470	2200	мкФ	
C2	Конденсатор	Ємність	470	2200	мкФ	
R1	Резистор	Опір	330	680	Ом	Тільки для схем 1...3
R2	Резистор	Опір	910	1100	Ом	Тільки для схем 1...3
R3	Резистор	Опір	100	1000	Ом	Тільки для схем 1...3
R4	Потенціом.	Опір	10	1000	Ом	Тільки для схем
		Стан	0	100	%	Оперативне регулювання
R5	Резистор	Опір	100	1000	Ом	Тільки для схем 1...3
$R_н$	Резистор	Опір	10	100	Ом	Оперативне регулювання
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Середнє значення
ПК	Пристрій керування	Кут регулювання	90	160	град.	Оперативне регулювання

Таблиця 3.3 – **Досліджувані параметри**

Позначення	Осцилограми електричних процесів
C1, U	Напруга $u_{C1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{C1}(t)$ конденсатора ***C1***
C2, U	Напруга $u_{C2}(t)$ на конденсаторі ***C2***
C2, I	Струм $i_{C2}(t)$ конденсатора ***C2***
VT1, $U_{ке}$	Напруга $u_{VT1}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT1***
VT1, $I_к$	Струм $i_{VT1}(t)$ колектора транзистора ***VT1***
VT1, $U_{бе}$	Напруга $u_{б1}(t)$ база–емітер транзистора ***VT1***
VT1, $I_б$	Струм $i_{б1}(t)$ бази транзистора ***VT1***
VT2, $U_{ке}$	Напруга $u_{VT2}(t)$ колектор–емітер транзистора ***VT2***
VT2, $I_к$	Струм $i_{VT2}(t)$ колектора транзистора ***VT2***
VT2 $U_{бе}$	Напруга $u_{б2}(t)$ база–емітер транзистора ***VT2***
VT2, $I_б$	Струм $i_{б2}(t)$ бази транзистора ***VT2***
VD1, U	Напруга $u_{VD1}(t)$ катод–анод стабілітрона ***VD1***
VD1, I	Стум $i_{VD1}(t)$ стабілітрона ***VD1***
$R_н$***, U***	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні $R_н$
$R_н$***, I***	Струм $i_н(t)$ навантаження $R_н$

5.3 Поясніть, в який спосіб взаємодіють елементи стабілізатора за зменшення напруги живлення, збільшення опору навантаження, зменшення величини опорної напруги.

5.4 У який спосіб параметри елементів стабілізатора визначають межі діапазону стабілізації?

5.5 В чому полягає принцип еталонної (опорної) напруги в схемі стабілізатора?

5.6 Які показники й характеристики стабілізатора й у якій послідовності слід враховувати при визначанні можливості його роботи разом з конкретним навантаженням?

5.7 Наведіть варіант схеми стабілізатора з використанням транзисторів іншої структури.

5.8 Від чого залежить величина номінального значення вихідної напруги стабілізатора?

5.9 Які недоліки властиві транзисторному компенсаційному стабілізатору неперервної дії і яка є їхня природа?

5.10 Назвіть переваги досліджуваного стабілізатора перед стабілізатором імпульсної дії.

5.11 В чому полягає роль підсилювача постійного струму у складі компенсаційного стабілізатора напруги і в який спосіб впливає величина коефіцієнта підсилювання в колі зворотного зв'язку на параметри стабілізатора?

5.12 З якою метою в стабілізаторі використовується складений регулювальний елемент?

5.13 Що таке коефіцієнт стабілізації, коефіцієнт згладжування та внутрішній опір стабілізатора? Для чого потрібно визначати ці параметри?

5.14 На якому елементі стабілізатора розсіюється найбільша потужність? В який спосіб це позначається на к. к. д. схеми?

5.15 Напруга на вході стабілізатора становить 22 В, напруга стабілізації 12 В, струм навантаження 2 А. Визначте приблизну потужність, розсіювану на регулювальному елементі та к. к. д. стабілізатора.

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити за рекомендованою літературою теоретичний матеріал щодо особливостей функціональної, схемотехнічної побудови транзисторних стабілізаторів напруги з неперервним регулюванням, процесів функціонування, області застосовування. Ознайомитися з принциповою схемою макета, особливостями функціонування та його конструктивним виконанням.

6.2 Здійснити вимірювання електричних параметрів та характеристик чотирьох варіантів (***k* = 1, 2, 3, 4)** схем стабілізатора: з активним колекторним наванта-женням підсилювача постійного струму – схема 1 (***k* = 1**); зі стабілізатором струму в колі колектора підсилювача постійного струму – схема 2 (***k* = 2**); з живленням підсилювача постійного струму від окремого джерела постійної напруги – схема 3 (***k* = 3**); на інтегральній мікросхемі КР142ЕН8Б – схема 4 (***k* = 4**);

- за постійності величини опору навантаження $R_н$ і зміні напруги $U_{вх}$ на вході стабілізатора – напруги $U_ж$ джерела живлення **РДЖ:** $I_н$, $U_н$, $I_{вх} = I_ж$;
- за постійності величини вхідної напруги $U_{вх} = U_ж$ і змінювання опору навантаження $R_н$: $I_н$, $U_н$, $I_{вх} = I_ж$.

6.3 За результатами вимірювань п. 6.2 розрахувати величини: $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_н$, $P_{вх}$, $P_н$, $N_{вх}$, $N_н$, $r_{ст}$, $K_{ст}$, η.

6.4 Осцилографічно визначити коефіцієнт згладжування пульсацій стабілізатором.

6.5 Зробити висновки за результатами роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити за рекомендованою літературою [2.1...2.5] та матеріалами даної лабораторної роботи особливості структурної, функціональної, схе-

мотехнічної побудови напівпровідникового стабілізатора, його функціонування. Вивчити особливості схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд.3). Взяти у викладача варіанти досліджуваних схем стабілізаторів: **“Схема1”(*k* = 1)...”Схема4” (*k* = 4)** (див. рис. 3.2...3.5), контрольні запитання що досліджуваного матеріалу і підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму й обсяг подавання відповідей.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування лабораторної роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою щодо допуску для подальшого виконування роботи є з'ясування особливостей виконання лабораторного макета та знання всієї послідовності робочих процедур на ньому.

*7.2 До пункту 6.2. Вимірювання електричних параметрів та характеристик досліджуваних стабілізаторів: з активним колекторним навантаженням підсилювача постійного струму – схема 1 (**k = 1**); зі стабілізатором струму в колі колектора підсилювача постійного струму – схема 2 (**k = 2**); з живленням підсилювача постійного струму від окремого джерела постійної напруги – схема 3 (**k = 3**); на інтегральній мікросхемі КР142ЕН8Б – схема 4 (**k = 4**).*

Вибір досліджуваної схеми здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1). Потенціометром ***R4*** встановлюється задане викладачем номінальне значення вихідної напруги $U_{н\ ном}$ стабілізатора, контрольоване приладом ***PV2***. Рівень вхідної напруги стабілізатора має перебувати в діапазоні $U_{п\ min}…U_{п\ max}$ ($U_{п\ min} > U_{н\ ном}$). Він установлюється змінюванням кута регулювання тиристорами ***VS1, VS2*** випрямляча за допомогою пристрою (схеми) керування ***ПК*** регульованого джерела живлення **РДЖ**. Величина вхідної напруги $U_{вх} = U_{ж}$ контролюється приладом ***PV1***. Струм $I_{вх} = I_{ж}$, споживаний стабілізатором, контролює прилад ***PA1***, а віддаваний $I_{н}$ у навантаження – ***PA2***.

7.2.1 Дослідження щодо першої умови пункту 6.2: $U_{н}$, $N_{н}$, $K_{ст}$, $r_{ст}$, $\eta = f(U_{вх})$ за $R_{н} = const$.

За допомогою опору $R_{н}$ установити за допомогою приладу ***PA2*** номінальне значення вихідного струму стабілізатора дорівнюваним $I_{н\ ном}$.

Для зняття характеристик стабілізатора за змінювання вхідної напруги $U_{вх} = U_{ж}$ (шляхом змінювання кута регулювання вихідного сигналу ***ПК***) слід змінювати його інтервалами через **2 В** спочатку у бік збільшення (до значення $U_{ж\ max}$), а потім – у бік зменшення (до значення напруги $U_{ж\ min}$, близького до напруги $U_{н}$), відзначаючи для кожного значення $U_{вх} = U_{ж}$ покази приладів ***PA1*** (струм $I_{вх} = I_{ж}$), ***PA2*** (струм $I_{н}$), ***PV2*** (напруга $U_{н}$). Результати вимірювань занести до експериментальної частини таблиці 7.1 **(*k*)**, де ***k*** – варіант схеми стабілізатора **(*k* = 1, 2, 3, 4)**.

Таблиця 7.1 **(*k*) – Результати досліджень**

№ вим. п/п	Експериментальна частина				Розрахункова частина									
	$U_{вх}$, В	$U_{н}$, В	$I_{вх}$, А	$I_{н}$, А	$\Delta U_{вх}$, В	$\Delta U_{н}$, В	$U_{н}$, В	$N_{вх}$	$N_{н}$	$K_{ст}$	$r_{ст}$, Ом	$P_{вх}$, Вт	$P_{н}$, Вт	η, %
1 2 …														

7.2.2 Дослідження щодо другої умови пункту 6.2: $U_н$, $N_н$, $K_{ст}$, $r_{ст}$, $\eta = f(R_н)$ *за* $U_{вх} = U_{ж\ ном} = const$.

Вихідний стан органів регулювання та комутування макета є такий. Навантаження (опір $R_н$) відімкнено від стабілізатора, вхідна напруга $U_{вх} = U_ж$ стабілізатора встановлюється рівною номінальній напрузі ($U_{вх} = U_{вх\ ном} = U_{ж\ ном}$) (установлюється за допомогою пристроя керування **"*ПК*"** напруга $U_ж$ рис. 3.1). Після цього слід занести перші експериментальні дані ($U_{вх\ ном}$, $U_{н\ ном}$, $I_{вх}$, $I_н$) до таблиці 7.2 **(*k*)**.

Таблиця 7.2 **(*k*) – Результати досліджень**

№ вим. п/п	Експериментальні дані				Розрахункові дані									
	$I_{вх}$, А	$I_{н}$, А	$U_{н}$, В	$U_{вх}$, В	$\Delta U_{н}$, В	$\Delta I_{н}$, А	$r_{ст}$, Ом	$P_{вх}$, Вт	$P_{н}$, Вт	$N_п$	$N_н$	N_i	$K_{сті}$	η, %
1 2 …														

Після першого вимірювання слід підімкнути навантаження $R_н$ до виходу стабілізатора й установити мінімальне значення струму $I_н = I_{н_min}$ навантаження. Заповнити другий рядок експериментальної частини табл. 7.2 **(*k*)**. Після цього за допомогою регулятора **"$R_н$"** (див. рис. 3.1) змінювати значення струму навантаження $I_н$ щоразу, якщо треба, за допомогою пристроя керування ***ПК***, відновлюючи номінальне значення напруги $U_{вх\ ном}$. Заповнити далі таблицю 7.2 **(*k*)**, допоки не буде досягнуто номінального значення струму $I_{н\ ном}$ (не вище … **А**).

7.3 До пункту 6.3. Розрахункова частина роботи.

При заповнюванні розрахункової частини таблиць 7.1 та 7.2 слід мати на увазі, що віднаходження зазначених у них величин провадиться з урахуванням наведеного далі.

Головними дестабілізуючими чинниками, які спричинюють відхилення $\Delta U_{н} = U_{н} - U_{н\ ном}$ від номінального значення $U_{н\ ном}$ вихідної напруги $U_{н}$, є змінювання абсолютного значення нестабільності $\Delta U_{вх}$ вхідної напруги та струму $\Delta I_{н}$ навантаження перетворювача:

$$\Delta U_{вх} = U_{вх} - U_{вх\ ном}\ ; \qquad \Delta U_{ж} = U_{ж} - U_{ж\ ном}; \qquad \Delta I_{н} = I_{н\ ном} - I_{н}\ .$$

Їхні відносні величини – значення нестабільності – визначаються у вигляді

$$N_{вх} = \Delta U_{вх}/U_{вх\ ном}; \qquad N_{ж} = \Delta U_{ж}/U_{ж\ ном}; \qquad N_{i} = \Delta I_{н}/I_{н\ ном}\ .$$

Якість стабілізації даних перетворювачів електричної енергії оцінюється такими показниками:

- величина нестабільності (статична помилка) вихідної напруги
$$N_{н} = \Delta U_{н}/U_{н\ ном}\ ;$$
- коефіцієнт стабілізації напруги за вхідною напругою $U_{вх}$ за $I_{н} = \mathbf{const}$
$$K_{ст} = N_{вх}/N_{н};$$
- коефіцієнт стабілізації напруги за струмом $I_{н}$ навантаження за $U_{вх} = \mathbf{const}$
$$K_{сті} = N_{і}/N_{н};$$
- вихідний опір
$$r_{ст} = \Delta U_{н}/\Delta I_{н}.$$

Енергетичним показником якості, який оцінює функціонування перетворювачів електричної енергії, є коефіцієнт корисної дії η. Визначається як відношення корисної потужності $P_{н}$, котра виділяється в навантаженні $R_{н}$, до активної потужності $P_{вх} = P_{ж}$, споживаної від джерела електричної енергії з нестабілізованою напругою:

$$\eta = \frac{P_{н}}{P_{вх}} 100\ \%\ ;$$

$$P_{н} = U_{н} I_{н}\ ;\ P_{вх} = U_{вх}\ I_{вх}\ .$$

7.4 До пункту 6.4. Визначення коефіцієнта згладжування пульсацій стабілізатора.

Для вимірювання величини змінної складової напруги на вході й виході стабілізатора слід підмикати осцилограф до контрольних точок: у першому випадку – до "***C1,U***" – входу стабілізатора, а в другому – до "***C2,U***" – виходу стабілізатора лабораторного макета. При цьому на вході стабілізатора має бути встановлено рівень напруги $U_{вх} = U_{ж\ ном}$, а в навантаженні $R_{н}$ – номінальний струм $I_{н\ ном}$.

Осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової **ПС** вимкнено – рис. В.13 підрозд. В.1) підсилювача вертикального посилювання.

Коефіцієнт згладжування (зменшення змінної складової) стабілізатора розраховується за виразом

$$K_{зг} = \frac{U_{\sim вх} \cdot U_{н}}{U_{\sim н} \cdot U_{вх}},$$

де $U_{\sim вх} = U_{\sim ж}$, $U_{\sim н}$ – величини напруги (амплітудне значення) змінної складової відповідно на вході й виході стабілізатора.

До пункту 6.5. Висновки за результатами роботи.

Висновки з виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, в яких розкрито сутність спостережуваних явищ чи здобуваних залежностей.

Висновки має не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії та експерименту, пояснюючи принципову відмінність одного випадку від іншого (наприклад більшу стабільність вихідної напруги стабілізатора у разі змінювання струму навантаження порівняно з випадком змінювання вхідної напруги; причину згладжування пульсацій стабілізатором; порядок величини внутрішнього опору стабілізатора й т.д.).

8 Вимоги до протоколу. Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципову схему макета лабораторної роботи;

8.2 таблиці з результатами експерименту й розрахунків з даними для побудови потрібних характеристик;

8.3 виконані в єдиній координатній системі для кожної з умов п. 6.2 графіки залежностей:

- перша умова – $U_н$, $N_н$, $K_{ст}$, $r_{ст}$, $\eta = f(U_{вх})$ за $R_н = \text{const}$;
- друга умова – $U_н$, $N_н$, $K_{ст}$, $r_{ст}$, $\eta = f(R_н)$ за $U_{вх} = U_{ж\ ном} = \text{const}$;

8.4 визначені за допомогою осцилографа й розрахунку значення коефіцієнта згладжування стабілізатора $K_{згл}$;

8.5 висновки за результатами досліджень стабілізатора.

Лабораторна робота № 2.6
Дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом

1 Мета роботи

Вивчення принципів структурної, функціональної, схемотехнічної побудови й функціонування джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом.

Вивчення принципів функціональної схемотехнічної побудови й функціонування перетворювачів електричної енергії постійного струму однієї напруги на постійний струм іншої напруги.

Знайомство зі схемами імпульсних стабілізованих джерел постійної напруги.

Освоєння методики експериментального визначання головних характеристик, показників якості джерел вторинного електроживлення у режимі стабілізації напруги.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.;Под ред. Ю.Д. Козляева – М.: Радио и связь, 1998. – С. 69 – 197.

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др. Электропитание устройств связи. –М.: Радио и связь, 1981. – С. 79–220.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986 – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др. Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975. § 9.1, 9.2 , 9.3. – С. 113 – 224, 226 – 287.

3 Опис лабораторного макета

Склад і можливості лабораторного макета

Лабораторний макет зображено на рис. 3.1, а його електрична схема – на рис. 3.2. Даний лабораторний макет призначено для дослідження джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом.

Лабораторний макет містить:

- джерело ***G1*** змінної напруги U_{G1};
- захисне коло – запобіжну ланку ***ЗЛ,*** утворену елементами ***F1, R1***;
- фільтр високочастотних завад ***ФЗ***, утворений елементами ***L1, C1…C3***;

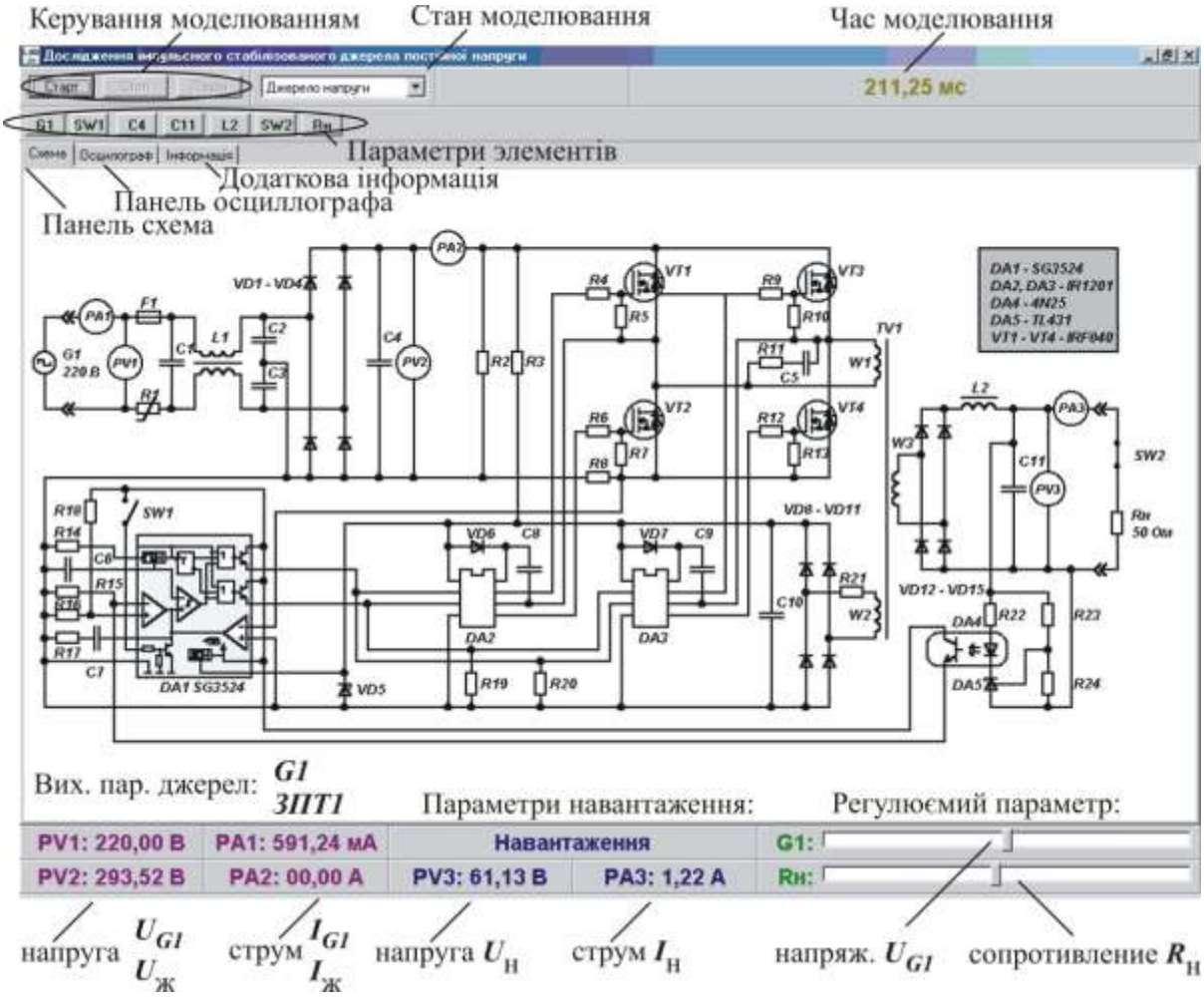


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

- ланку постійного струму ***ЛПС1*** (вхідні випрямляч ***В1*** і згладжувальний фільтр ***Ф1***), утворену елементами ***VD1…VD4, C4, R2***;
- інвертор ***І*** напруги, утворений елементами ***VT1…VT4, R4…R13, C5, TV1;***
- ланку постійного струму ***ЛПС2*** (вихідні випрямляч **В2** і згладжувальний фільтр ***Ф2***), утворену елементами ***VD12…VD15, L2, C11***;
- пристрій керування ***ПК***, утворений елементами ***DA1, R14, R18, C6, C7***;
- драйвери Д силових ключів інвертора ***І***, утворені елементами ***DA2, DA3, VD6, VD7, R19, R20, C8, C9***;
- малопотужне джерело вторинного електроживлення ***ДВЕ***, утворене елементами ***VD5, VD8…VD11, R3, R21, C10***;
- коло від'ємного зворотного зв'язку ***ВЗЗ***, утворене елементами, ***DA4, DA5, R22…R24***;

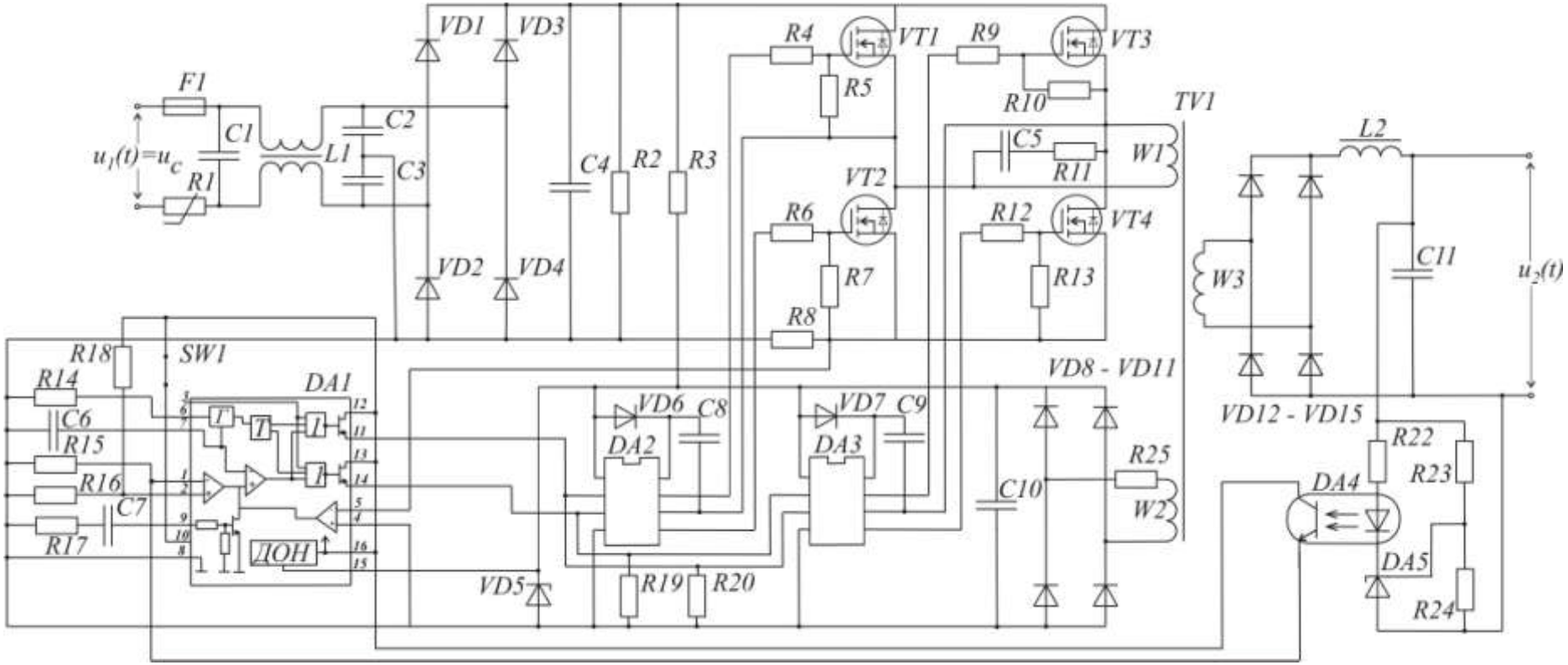


Рисунок 3.2 – Електрична схема макета

- опір навантаження $R_н$ джерела ***БДВЕ***;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** діючого значення напруги $U_м = U_{G1}$ на виході джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** діючого значення струму $I_м = I_{G1}$, споживаного від джерела живлення ***G1***;
- вольтметр ***PV2*** середнього значення напруги $U_ж$ на виході ***ЛПС1***;
- амперметр ***PA2*** середнього значення струму $I_ж$, споживаного від ***ЛПС1***;
- вольтметр ***PV3*** середнього значення вихідної напруги $U_н$ джерела ***БДВЕ***;
- амперметр ***PA3*** середнього значення струму $I_н$ навантаження джерела ***БДВЕ***.

Список елементів макета подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – **Склад лабораторного макета**

№ поз.	Тип елемента	Регульовані параметри				Примітка
		параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело змінної напруги	Напруга	154	286	В	Оперативне регулювання
		Частота	50	400	Гц	
C4	Конденсатор	Ємність	220	2200	мкФ	
C11	Конденсатор	Ємність	220	2200	мкФ	
L2	Дросель	Індуктивність	10	10000	мГн	
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач пристроя керування
SW2	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
$R_н$	Резистор	Опір	6	100	Ом	Оперативне регулювання
PV1	Вольтметр					Діюче значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PV3	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Діюче значення
PA2	Амперметр					Середнє значення
PA3	Амперметр					Середнє значення

На панель оперативних регулювань виведено опір резистора навантаження $R_н$ і напругу U_{G1} генератора ***G1***.

Діюче значення напруги та струму генератора ***G1*** контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги й струму на виході випрямляча ***B1*** (ланки постійного струму ***ЛПС1***) ко-

нтролюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***. Середні значення напруги $U_н$ і струму $I_н$ навантаження $R_н$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV3*** та амперметром ***PA3***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг та струмів у різних точках схеми. Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи пристроя керування. Тривалість розгортки проградуйовано в секундах і становить 0,001…1000 мс/поділку. Список контрольних точок осцилографа наведено у табл. 3.2 Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

4 Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови перетворювачів електричної енергії змінної та постійної напруги (струму);
- особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом ***БДВЕ***;
- процеси функціонування в перетворювачах електричної енергії змінної й постійної напруги та струму;
- особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для подальшого виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача електричної енергії – джерела ***БДВЕ***, ціль кожного досліду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні запитання

5.1 Де й для чого використовуються перетворювачі електричної енергії джерела змінного (постійного) струму (напруги) на постійний (змінний) струм (напругу)?

Таблиця 3.2 – **Досліджувані параметри**

Позначення	**Осцилограми електричних процесів**
G1, U	Напруга $u_C(t)$ на виході генератора ***G1***
G1, I	Струм $i_C(t)$, споживаний від генератора ***G1***
DA1, вивід **1 (*EA –*)**	Напруга $u_{11}(t)$ на виводі 1 мікросхеми ***DA1*** (інвертувальний вхід підсилювача помилки)
DA1, вивід **2 (*EA +*)**	Напруга $u_{12}(t)$ на виводі 2 мікросхеми ***DA1*** (неінвертувальний вхід підсилювача помилки)
DA1, вивід **3 (*OSC OUT*)**	Напруга $u_{13}(t)$ на виводі 3 мікросхеми ***DA1*** (вихід генератора)
DA1, вивід **4 (*CUR +*)**	Напруга $u_{14}(t)$ на виводі 4 мікросхеми ***DA1*** (неінвертувальний вхід обмежувача струму)
DA1, вивід **5 (*CUR –*)**	Напруга $u_{15}(t)$ на виводі 5 мікросхеми ***DA1*** (інвертувальний вхід обмежувача струму)
DA1, вивід **7 (*CT*)**	Напруга $u_{17}(t)$ на виводі 7 мікросхеми ***DA1*** (частотозадавальний конденсатор)
DA1, вивід **9 (*COMP*)**	Напруга $u_{19}(t)$ на виводі 9 мікросхеми ***DA1*** (вхід компаратора)
DA1, вивід **10 (*SHUTDOWN*)**	Напруга $u_{110}(t)$ на виводі 10 мікросхеми ***DA1*** (вхід блокування)
DA1, вивід **11 (*E1*)**	Напруга $u_{111}(t)$ на виводі 11 мікросхеми ***DA1*** (емітер транзистора 1)
DA1, вивід **14 (*E2*)**	Напруга $u_{114}(t)$ на виводі 14 мікросхеми ***DA1*** (емітер транзистора 2)
DA1, вивід **15 (*Vcc*)**	Напруга $u_{115}(t)$ на виводі 15 мікросхеми ***DA1*** (напруга живлення)
DA1, вивід **16 (*Vref*)**	Напруга $u_{116}(t)$ на виводі 16 мікросхеми ***DA1*** (опірна напруга)
TV1, W1_U	Напруга $u_{W1}(t)$ трансформатора ***TV1*** обмотки ***W1***
TV1, W1_I	Струм $i_{W1}(t)$ обмотки ***W1*** трансформатора ***TV1***
TV1, W3_U	Напруга $u_{W3}(t)$ обмотки ***W3*** трансформатора ***TV1***
TV1, W3_I	Струм $i_{W3}(t)$ обмотки ***W3*** трансформатора ***TV1***
L2, U	Напруга $u_{L2}(t)$ на дроселі ***L2***
L2, I	Струм $i_{L2}(t)$ дроселя ***L2***
C4, U	Напруга $u_{C4}(t)$ на конденсаторі ***C4***
C4, I	Струм $i_{C4}(t)$ на конденсаторі ***C4***
C11, U	Напруга $u_{11}(t)$ на конденсаторі ***C11***
C11, I	Струм $i_{11}(t)$ конденсатора ***C11***
$R_н$***, U***	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні ***БДВЕ***
$R_н$***, I***	Струм навантаження

5.2 З яких функціональних вузлів складаються перетворювачі електричної енергії джерела постійного (змінного) струму (напруги) на постійний (змінний) струм (напругу)?

5.3 Де й для чого використовуються перетворювачі електричної енергії джерела змінного струму (напруги) на постійний (змінний) струм (напругу)?

5.4 З яких функціональних вузлів складаються перетворювачі електричної енергії п. 5.3? Поясніть особливості їхнього функціонування.

5.5 Принципи побудови й функціонування джерел живлення з безтрансформаторним входом ***БДВЕ***. Які є їхні переваги й недоліки?

5.6 Поясніть призначення кожного функціонального елемента схеми досліджуваного джерела з безтрансформаторним входом ***БДВЕ***. З'ясуйте фізичні процеси, що відбуваються в кожному з елементів схеми.

5.7 Зобразіть діаграми струмів та напруг у колах та елементах схеми.

5.8 Які показники якості схарактеризовують перетворювач електричної енергії ***БДВЕ***?

5.9 Поясніть основні показники якості ***БДВЕ***: коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт стабілізації, коефіцієнт згладжування.

Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити за рекомендованою літературою теоретичний матеріал про особливості реалізації джерел вторинного електроживлення з безтрансформаторним входом ***БДВЕ***, процеси їхнього функціонування, області їхнього застосовування. Ознайомитися з принциповою схемою макета та конструктивним його виконанням.

6.2 Зробити вимірювання електричних параметрів та характеристик стабілізованих перетворювачів електричної енергії:

6.2.1 перетворювача змінної напруги (струму) на постійну напругу:

1) за сталості величини опору навантаження $R_н$ та змінювання напруги $U_{вх}$ на вході стабілізованого ***БДВЕ*** – напруги $U_м$ на виході джерела живлення ***G1***: $I_{вх} = I_м$, $U_н$, $I_н$,$U_ж$, $I_ж$;

2) за сталості величини вхідної напруги $U_{вх} = U_м$ і змінювання опору навантаження $R_н$: $I_{вх} = I_м$, $I_н$, $U_н$;

6.2.2 перетворювача постійного струму однієї напруги на постійний струм іншої напруги:

1) за сталості величини опору навантаження $R_н$ та змінювання напруги $U_ж$ на виході ***ЛПС1*** – джерела живлення перетворювача: $I_ж$, $I_н$, $U_н$;

2) за сталості величини вхідної напруги $U_ж$ та змінювання опору навантаження $R_н$: $I_ж$, $I_н$, $U_н$.

6.3 За результатами вимірювань п. 6.2.1 розрахувати величини: $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_н$, $S_{вх}$, $N_{вх}$, $N_н$, $r_{ст}$, $K_{ст1}$, $K_{стi}$, $P_ж$, $P_н$, $\cos\varphi$, η_1. За результатами вимі-

рювань п. 6.2.2 розрахувати величини: $\Delta U_{ж}$, $\Delta U_{н}$, $N_{ж}$, $N_{н}$, $r_{ст}$, $K_{ст2}$, $K_{стi}$, $P_{ж}$, $P_{н}$, η_2.

6.4 Визначити коефіцієнт згладжування пульсацій стабілізатором.

6.5 Зробити висновки за результатами роботи.

7 Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити за рекомендованою літературою [2.1…2.5] і матеріалами даної лабораторної роботи особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови стабілізованого ***БДВЕ***, особливості його функціонування. Вивчити особливості схемотехнічного виконання лабораторного макета (див. розд. 3). Одержати у викладача контрольні запитання щодо досліджуваного матеріалу і підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму та обсяг подавання відповідей.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування лабораторної роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою допуску до подальшого виконування роботи є з'ясування особливостей виконання лабораторного макета та знання всієї послідовності робочих процедур на ньому.

7.2 До пункту 6.2. Вимірювання електричних параметрів та характеристик досліджуваних стабілізованих перетворювачів електричної енергії.

Рівень, значення вихідної напруги $U_{н}$ стабілізованих перетворювачів контролюється приладом ***PV3***. Рівень вихідної напруги U_{G1} синусоїдного генератора ***G1*** може перебувати в діапазоні **154…286 В**. Є можливість його плавного регулювання за допомогою регулятора ***G1*** (див. рис. 3.1). Величина напруги на виході джерела ***G1*** – вхідної напруги $U_{вх} = U_{м} = U_{G1}$ стабілізованого ***БДВЕ*** контролюється приладом ***PV1***. Струм $I_{вх} = I_{м} = I_{G1}$, споживаний від джерела ***G1*** стабілізованим перетворювачем, контролює прилад ***PA1***, а віддаваний $I_{н}$ у навантаження – ***PA3***. Середнє значення напруги $U_{ж}$ на виході ланки постійного струму ***ЛПС1*** (вході інвертора ***I***) контролюється приладом ***PV2***, а струм $I_{ж}$, споживаний інвертором ***I***, – приладом ***PA2***.

7.2.1 До пункту 6.2.1 Дослідження перетворювача змінної напруги на постійну.

Дослідження з першої умови пункту 6.2.1

За допомогою опору $R_{н}$ установити по приладу ***PA3*** номінальне значення вихідного струму стабілізатора, рівне … (задається викладачем).

Для зняття характеристик стабілізованого ***БДВЕ*** – перетворювача змінної напруги на постійну – за змінювання вхідної напруги $U_{вх} = U_{м}$ слід змінювати її сходинками через **10...20 В** від номінального значення вхідної напруги $U_{вх\ ном} = U_{м\ ном} = 220$ **В** спочатку у бік збільшення (до значення

286 В), а потім – у бік зменшення (до значення 154 В), відзначаючи для кожного значення $U_{вх} = U_м$ покази приладів ***PA1*** (струм $I_{вх} = I_м$), ***PA2*** (струм $I_ж$), ***PA3*** (струм $I_н$), ***PV2*** (напруга $U_ж$), ***PV3*** (напруга $U_н$).

Номінальне значення напруги $U_{н\ ном}$ та струму $I_{н\ ном}$ навантаження контролювати по приладах відповідно ***PV3, PA3*** за номінального значення вхідної напруги $U_{вх\ ном}$ 220 В. Результати вимірювань занести до експериментальної частини таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – **Результати досліджень**

№ Виміру	Експериментальна частина						Розрахункова частина											
	$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, А	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$U_н$, В	$I_н$, А	$\Delta U_{вх}$, В	$\Delta U_н$, В	$S_{вх}$, ВА	$\Delta I_н$, А	$r_{ст}$, Ом	$P_ж$ Вт	$P_н$, Вт	η_1, %	$N_{вх}$	$N_н$	$K_{ст1}$	cos φ
1																		
2																		
…																		

Дослідження з другої умови пункту 6.2.1

Вихідний стан органів регулювання та комутування макета є такий. Навантаження (опір $R_н$) відімкено від ***БДВЕ***, напруга $U_{вх} = U_м$ на вході стабілізованого ***БДВЕ*** встановлюється (за узгодженням з викладачем), наприклад 220 В ($U_{м\ ном}$ = 220 В) (установлюється за допомогою регулятора "***G1***" напруга U_{G1} – рис. 3.1). Після цього слід занести перші експериментальні дані до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – **Результати досліджень**

№ Виміру	Експериментальна частина						Розрахункова частина											
	$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, А	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$U_н$, В	$I_н$, А	$\Delta U_{вх}$, В	$\Delta U_н$, В	$S_{вх}$, ВА	$\Delta I_н$, А	$r_{ст}$, Ом	$P_ж$ Вт	$P_н$, Вт	η_2, %	$N_{вх}$	$N_н$	$K_{ст1}$	cos φ
1																		
2																		
…																		

Установлені рівні напруги $U_{вх} = U_м$ та $U_н$ вважатимемо при цьому за номінальні: $U_{вх} = U_{вх\ ном}$; $U_н = U_{н\ ном}$. Після першого вимірювання слід підімкнути навантаження $R_н$ до виходу стабілізованого ***БДВЕ*** й установити мінімальне значення струму $I_н = I_{н_min}$ навантаження. Заповнити другий рядок експериментальної частини таблиці 7.2. Після цього за допомогою регулятора **"$R_н$"** (див. рис. 3.1) змінювати значення струму навантаження

$I_н$, щоразу, якщо треба, за допомогою регулятора "***G1***" – рис. 3.1, відновлюючи номінальне значення напруги $U_{вх} = U_{вх\ ном}$. Для кожного значення струму навантаження $I_н$ (показання приладів ***PA3***) контролювати показання приладів ***PV1*** (напруга $U_{вх} = U_м$), ***PA2*** (струм $I_{вх} = I_м$), ***PV3*** (напруга $U_н$), ***PA2*** (струм $I_ж$), ***PV2*** (напруга $U_ж$). Результати вимірювань занести до таблиці 7.2. Заповнити далі таблицю 7.2, допоки не буде досягнуто номінального значення струму $I_{н\ ном}$.

7.2.2 До пункту 6.2.2 Дослідження перетворювача постійного струму однієї напруги на постійний струм іншої напруги.

Дослідження з першої умови пункту 6.2.2

За допомогою опору $R_н$ установити по приладу ***PA3*** номінальне значення вихідного струму стабілізатора, рівне $I_{н\ ном}$.

Для зняття характеристик стабілізованого перетворювача постійної напруги за змінювання вхідної напруги $U_ж$ (шляхом зміни регулювання напруги U_{G1} генератора ***G1***) слід змінювати її U_{G1} сходинками через **10...20 В** від номінального значення $U_{G1\ ном}$ = 220 В спочатку у бік збільшення (до значення 286 В), а потім – у бік зменшення (до значення 154 В), відзначаючи для кожного значення U_{G1} показання приладів ***PA2*** (струм $I_ж$), ***PA3*** (струм $I_н$), ***PV2*** (напруга $U_ж$), ***PV3*** (напруга $U_н$). Номінальні значення напруг $U_{ж\ ном}$, $U_{н\ ном}$, $I_{н\ ном}$ контролювати по приладах відповідно ***PV2, PV3, PA3*** за номінальної напруги $U_{G1\ ном}$ джерела ***G1***, рівному 220 В ($U_{G1ном}$ = 220 В).

Результати вимірювань занести до експериментальної частини табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – **Результати досліджень**

№ Виміру	Експериментальна частина				Розрахункова частина									
	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$U_н$, В	$I_н$, А	$\Delta U_{вх}$, В	$\Delta U_н$, В	$\Delta I_н$, А	$r_{ст}$, Ом	$P_ж$ Вт	$P_н$, Вт	η_2, %	$N_{вх}$	$N_н$	$K_{ст}$
1														
2														
…														

Дослідження з другої умови пункту 6.2.2

Вихідний стан органів регулювання й комутації макета є такий. Навантаження (опір $R_н$) відімкнено від перетворювача постійної напруги, напруга $U_ж$ перетворювача контролюється по вольтметру ***PV2*** і регулюється за допомогою регулятора ***G1*** напруги U_{G1} – рис. 3.1. Після цього слід занести перші експериментальні дані до табл. 7.4.

Установити номінальне значення $U_{G1\ ном}$ рівним 220 В. Зафіксувати при цьому по ***PV2, PV3*** рівень напруг $U_ж$ й $U_н$, які вважатимемо за номінальні: $U_ж = U_{ж\ ном}$; $U_н = U_{н\ ном}$.

Після першого вимірювання слід підімкнути навантаження $R_н$ до виходу перетворювача й установити мінімальне значення струму $I_н = I_{н_min}$ навантаження. Заповнити другий рядок експериментальної частини таблиці 7.4. Після цього за допомогою регулятора **"$R_н$"** (рис. 3.1) змінювати значення струму навантаження $I_н$ із кроком, наприклад, $I_{н\ ном}$/(5..7) **А**, щоразу, якщо треба, за допомогою регулятора "***G1***" (рис. 3.1) відновлюючи номінальне значення напруги $U_{ж\ ном}$.

Для кожного (допоки не буде досягнуто номінального значення струму $I_{н\ ном}$) значення струму навантаження $I_н$ (показання приладу – амперметра ***PA3***) контролювати показання приладів ***PV2*** (напруга $U_ж$), ***PV3*** (напруга $U_н$).

Результати вимірювань занести до таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – **Результати досліджень**

№ виміру	Експериментальна частина				Розрахункова частина										
	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$U_н$, В	$I_н$, А	$\Delta U_ж$, В	$\Delta U_н$, В	ΔI, А	$\Delta I_ж$, А	$r_{ст}$, Ом	$P_ж$ Вт	$P_н$, Вт	η_2, %	$N_ж$	$N_н$	$K_{ст}$
1															
2															
…															

7.3 До пункту 6.3. Розрахункова частина роботи.

Основними дестабілізуючими чинниками, що спричинюють відхилення $\Delta U_н = U_н - U_{н\ ном}$ від номінального значення $U_{н\ ном}$ вихідної напруги $U_н$, є змінювання абсолютного значення нестабільності вхідної напруги $\Delta U_{вх}$ (у разі використовування джерела ***G1*** первинного електроживлення зі змінною напругою) або $\Delta U_ж$ (у разі використовування джерела первинного електроживлення з постійною напругою $U_ж$) і струму $\Delta I_н$ навантаження перетворювача:

$$\Delta U_{вх} = U_{вх} - U_{вх\ ном}; \qquad \Delta U_ж = U_ж - U_{ж\ ном}; \qquad \Delta I_н = I_{н\ ном} - I_н.$$

Їхні відносні величини – значення нестабільності – визначаються у вигляді

$$N_{вх} = \Delta U_{вх}/U_{вх\ ном}; \qquad N_ж = \Delta U_ж/U_{ж\ ном}; \qquad N_I = \Delta I_н/I_{н\ ном}.$$

Якість стабілізації перетворювачів електричної енергії оцінюється такими показниками якості:

- величиною нестабільності (статичною помилкою) вихідної напруги:

$$N_н = \Delta U_н / U_{н\ ном};$$

- коефіцієнтами $K_{ст1}$ та $K_{ст2}$ стабілізації напруги за вхідною напругою $U_{вх}$ (для перетворювача змінної напруги), $U_ж$ (для перетворювача постійної напруги) за $I_н$ = **const**:

$$K_{ст1} = N_{вх}/N_н; \qquad K_{ст2} = N_ж/N_н;$$

- коефіцієнтом стабілізації напруги за струмом $I_н$ навантаження за $U_{вх}$ = **const**:

$$K_{сті} = N_i/N_н;$$

- вихідним опором

$$r_{ст} = \Delta U_н / \Delta I_н.$$

Енергетичним показником якості, що оцінює функціонування перетворювачів електричної енергії, є коефіцієнт корисної дії η.

Коефіцієнт корисної дії визначається як відношення корисної потужності $P_н$, що виділяється в навантаженні $R_н$, до активної потужності $P_{вх}$ (у разі використовування джерела електроживлення ***G1*** змінної напруги) або $P_ж$ (у разі використовування як джерела електроживлення постійної напруги (струму) з напругою $U_ж$), споживаною від джерела електричної енергії з нестабілізованою напругою:

$$\eta_1 = \frac{P_н}{P_{вх}} \cdot 100\,\%; \qquad \eta_2 = \frac{P_н}{P_ж} \cdot 100\,\%;$$

$$P_н = U_н I_н;$$

$$P_{вх} = U_{вх} I_{м1}.$$

де $I_{м1}$ – перша гармоніка струму $I_м$, споживаного від джерела змінної напруги.

Якщо знехтувати енергетичними втратами в елементах фільтра ***ФП*** імпульсних завад і ланки постійного струму ***ЛПС1***, то $P_{вх} \approx P_ж$.

Стабілізований перетворювач змінної напруги на постійну функціонує від джерела ***G1*** змінної напруги, тому може оцінюватися й таким показником, як коефіцієнт потужності (визначається як відношення активної потужності $P_{вх}$, споживаної ***БДВЕ***, до повної потужності $S_{вх}$, яка підводиться до ***БДВЕ*** від джерела ***G1*** змінної напруги):

$$\cos\varphi = P_{вх}/S_{вх} \approx P_ж/S_{вх};$$

$$S_{вх} = U_{вх}\, I_{вх}.$$

При заповнюванні розрахункової частини таблиць 7.1...7.4 потрібне й віднаходження зазначених в них величин з урахуванням співвідношень п. 7.3.

7.4 До пункту 6.4. Визначення коефіцієнта згладжування пульсацій перетворювача постійної напруги на постійну.

Для вимірювання величини змінної складової напруги на вході (виході ланки постійного струму ***ЛПС1***) і виході стабілізованого перетворювача слід підімкнути осцилограф до контрольних точок: у першому випадку – до "***C4,U***" – вхідного кола електроживлення інвертора ***I*** стабілізовано-

го перетворювача, а в другому – до "***C11,U***" – виходу (кола навантаження) перетворювача. При цьому напруга U_{G1} генератора ***G1 БДВЕ*** має бути встановлена на рівні **220 В**, а в навантаженні $R_н$ має бути встановлено номінальний струм $I_{н\ ном}$.

Осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової ***ПС*** вимкнено – див. п. В.1 рис. В.13) підсилювача вертикального посилення.

Коефіцієнти пульсації: на вході (виході ланки постійного струму ***ЛПС1***) $K_{вх}$, на виході стабілізованого перетворювача $K_{пн}$, коефіцієнт $K_{згл}$ згладжування перетворювача (зменшення змінної складової) – розраховуються у вигляді

$$K_{пвх} = \frac{U_{\sim C4}}{U_{C4}} \cdot 100\%; \quad K_{пн} = \frac{U_{\sim н}}{U_н} \cdot 100\%; \quad K_{ЗГ} = \frac{K_{п\,вх}}{K_{пн}},$$

де $U_{\sim C4}$, $U_{\sim н}$ – величини напруг (амплітудні значення) змінних складових відповідно на вході й виході стабілізованого перетворювача постійної напруги на постійну; U_{C4}, $U_н$ – величини напруг постійних складових відповідно на вході й виході стабілізованого перетворювача.

7.5 До пункту 6.5. Висновки за результатами роботи.

Висновки щодо виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, у яких має бути розкрито сутність спостережуваних явищ або здобуваних залежностей.

Висновки мають не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, з'ясовуючи принципову відмінність одного випадку від іншого (наприклад більшу (чи меншу) стабільність вихідної напруги стабілізованих перетворювачів у разі змінювання струму навантаження порівняно з випадком змінювання вхідної напруги; причину згладжування пульсацій стабілізованого перетворювача постійної напруги на постійну; порядок величини внутрішнього опору стабілізатора й т.д.).

8 Вимоги до протоколу. Зміст звіту

Звіт має містити:

8.1 принципову схему макета лабораторної роботи;

8.2 таблиці з результатами експерименту й розрахунків, з даними для побудови потрібних характеристик;

8.3 виконані в єдиній координатній системі для кожної з умов п. 6.2 графіки залежностей:

- перша умова – $U_н$, $N_н$, $K_{ст1}$, $r_{ст}$, $\cos\varphi$, η_1, $= f(U_{вх})$ за $R_н = \text{const}$ для перетворювачів змінної напруги на постійну та $U_н$, $N_н$, $K_{ст2}$,

$r_{ст}$,
$\eta_2 = f(U_ж)$ за $R_н = \text{const}$ для перетворювачів постійної напруги на постійну;

- друга умова – $U_н$, $N_н$, $K_{сті}$, $r_{ст}$, $\cos\varphi$, $\eta_1 = f(R_н)$ за $U_{вх} = U_м = \text{const}$ для перетворювачів змінної напруги на постійну та $U_н$, $N_н$, $K_{сті}$, $r_{ст}$, $\eta_2 = f(R_н)$ за $U_{вх} = U_ж = \text{const}$;

8.4 визначене за допомогою осцилографа та розрахунку значення коефіцієнта згладжування стабілізатора $K_{згл}$ і пульсацій на вході $K_{п\ вх}$ та виході $K_{пн}$ перетворювача постійної напруги на постійну;

8.5 висновки за результатами досліджень стабілізованих перетворювачів.

Лабораторна робота № Ф1
Дослідження пристроїв та систем електроживлення модульної структури

1 Мета роботи

Вивчення принципів структурної, функціональної, схемотехничної побудови й функціонування пристроїв та систем електроживлення модульної структури. Вивчення особливостей функціонування імпульсних перетворювачів електричної енергії (***ПЕЕ***) з однофазним та багатофазним режимами перетворювання.

Експериментальне дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги з однофазним і багатофазним режимами перетворювання за симетрії та асиметрії електричних процесів.

Дослідження зовнішніх та регулювальних характеристик перетворювачів і особливостей їхньої схемотехничної реалізації з використовуванням силових каналів восьми типів з ШІМ методом регулювання.

Освоєння методики експериментального визначання головних характеристик, показників якості імпульсних ***ПЕЕ*** з однофазним і багатофазним режимами перетворювання.

2 Література

2.1 Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева – М.: Радио и связь, 1998. – С. 69–217.

2.2 Доморацкий О.А., Жерненко А.С. и др. Электропитание устройств связи. –М.: Радио и связь, 1981. – С. 79–220.

2.3 Иванов-Цыганов И.А. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991.– С. 208–260.

2.4 Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986 – С. 350 – 371.

2.5 Китаев В.Е., Бокуняев А.А. и др. Электропитание устройств. – М.: Связь, 1975. – С.113 – 224 .

3 Опис лабораторного макета

Лабораторний макет (рис. 3.1) призначено для дослідження перетворювачів електричної енергії ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури з однофазним режимом перетворювання електричної енергії основних типів – ***y*** схем силових каналів ***СК*** – з гальванічним зв'язком вхідних і вихідних кіл (однотактні ***ПК***: знижувальний (***y*** = 1), підвищувальний (***y*** = 2), полярно-інвертувальний (***y*** = 3)), з гальванічним розподілом (однотактні ***ПК***: з прямим вмиканням діода ***y*** = 4), зі зворотним вми-

канням діода (***y*** = 5); двотактні ***ПК***: з виведенням середньої точки трансформатора (***y*** = 6), мостові (***y*** = 7) і півмостові (***y*** = 8)).

У табл. 3.1 наведено стислий опис схем, які містяться в даному лабораторному макеті.

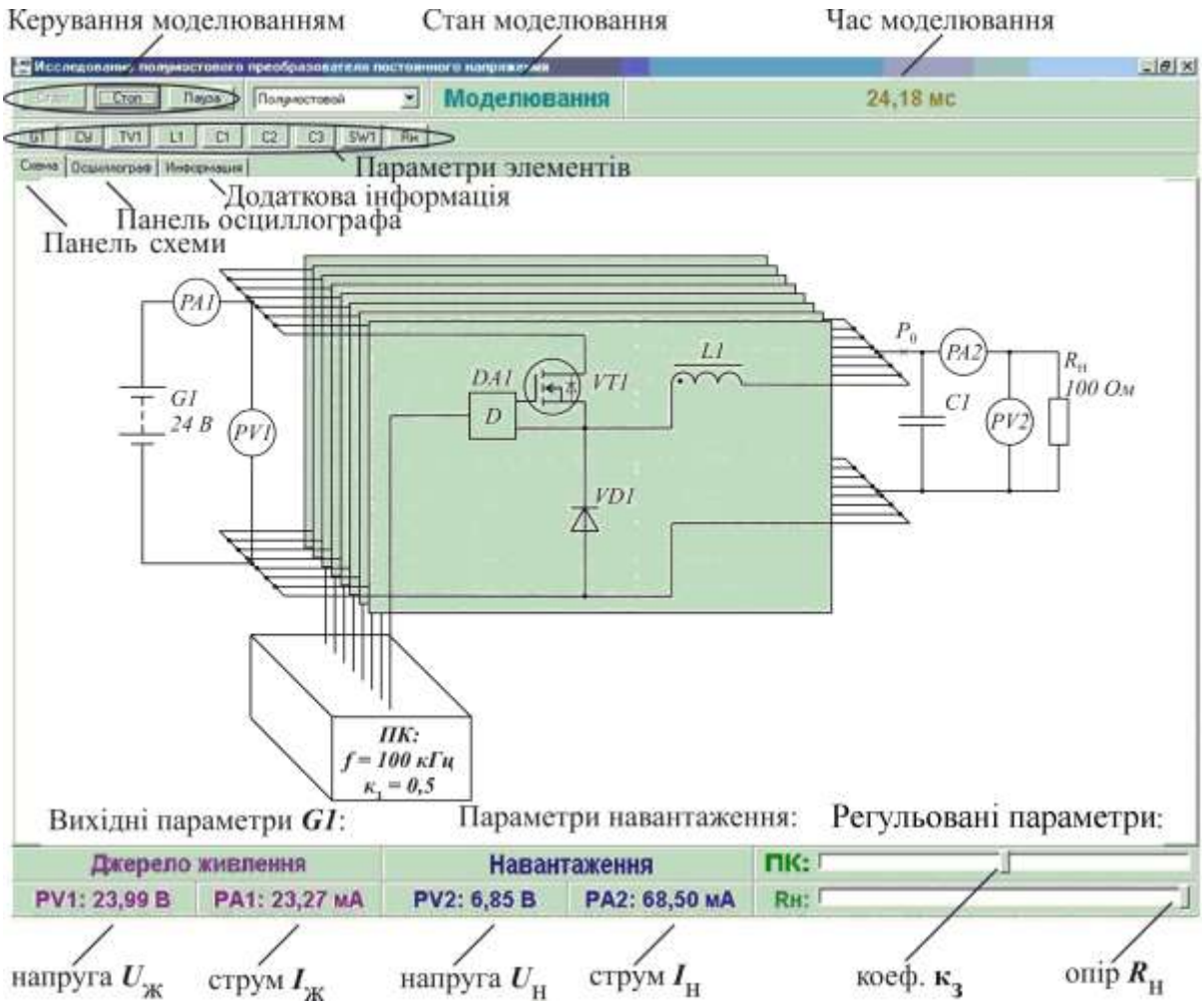


Рисунок 3.1 – Лабораторний макет

Лабораторний макет містить:

- джерело – генератор ***G1*** постійної напруги U_{G1};
- силову частину перетворювача постійної напруги модульної структури, виконану з восьми силових каналів – ***СК1***, ***СК2***, …, ***СК8*** і вихідного конденсатора ***C1***;
- опір $R_н$ навантаження перетворювача;
- чотириканальний осцилограф;
- вольтметр ***PV1*** напруги $U_ж$ на виході джерела ***G1***;
- амперметр ***PA1*** струму $I_ж$, споживаного від джерела ***G1***;
- вольтметр ***PV2*** вихідної напруги $U_н$ перетворювача;
- амперметр ***PA2*** струму $I_н$ навантаження перетворювача;

- пристрій керування ***ПК*** силовими каналами ***СК*** перетворювача.

Таблиця 3.1 – **Опис досліджуваних схем**

у	**Позначення в макеті**	**Опис**	**№ рис**
1	Знижувальний	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами знижувального типу	3.2
2	Підвищувальний	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами підвищувального типу	3.3
3	Інвертувальний	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами інвертувального типу	3.4
4	З прямим вмиканням діода	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами з прямим вмиканням діода	3.5
5	Зі зворотним вмиканням діода	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами зі зворотним вмиканням діода	3.6
6	З виводом середньої точки	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами з виводом середньої точки трансформатора	3.7
7	Півмостовий	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами півмостового типу	3.8
8	Мостовий	Багатоканальний імпульсний перетворювач з силовими каналами мостового типу	3.9

Лабораторний макет складається з: джерела первинного електроживлення ***G1***; восьми силових каналів, увімкнених паралельно як по входу, так і по виходу; вихідного конденсатора ***C1,*** призначеного для згладжування пульсацій вихідної напруги й опору навантаження $\boldsymbol{R_н}$. Опір навантаження $\boldsymbol{R_н}$ вимикається (і вмикається) за допомогою вимикача ***SW1***.

Керування силовими каналами здійснюється імпульсами від пристроя керування ***ПК***. Список елементів макета подано у табл. 3.2. На панель оперативних регулювань виведено опір резистора навантаження $\boldsymbol{R_н}$ і коефіцієнт заповнювання $\boldsymbol{к_з}$ імпульсів пристроя керування ***ПК***.

Середні значення напруги й струму джерела первинного електроживлення контролюються відповідно вольтметром ***PV1*** та амперметром ***PA1***. Середні значення напруги $\boldsymbol{U_н}$ та струму $\boldsymbol{I_н}$ навантаження $\boldsymbol{R_н}$ вимірюються відповідно вольтметром ***PV2*** та амперметром ***PA2***.

До набору контрольно-вимірювальних приладів входить також чотириканальний осцилограф, який дозволяє спостерігати форму напруг та струмів у різних точках схеми.

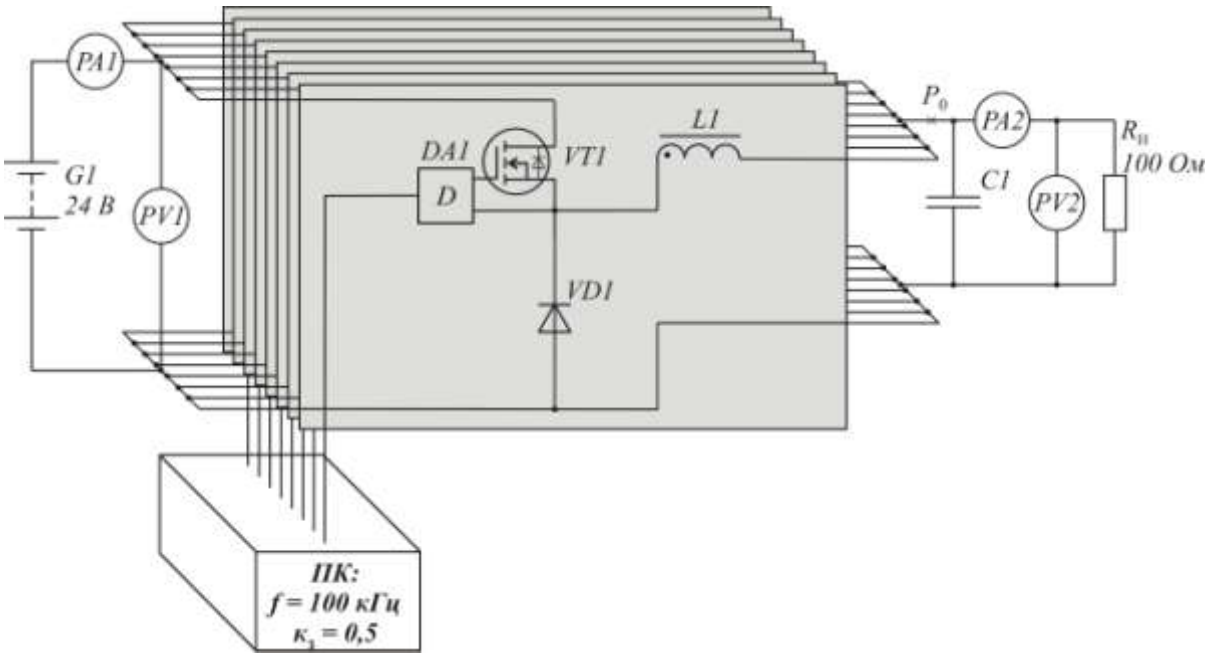


Рисунок 3.2 – Силові канали знижувального типу (***y*** = 1)

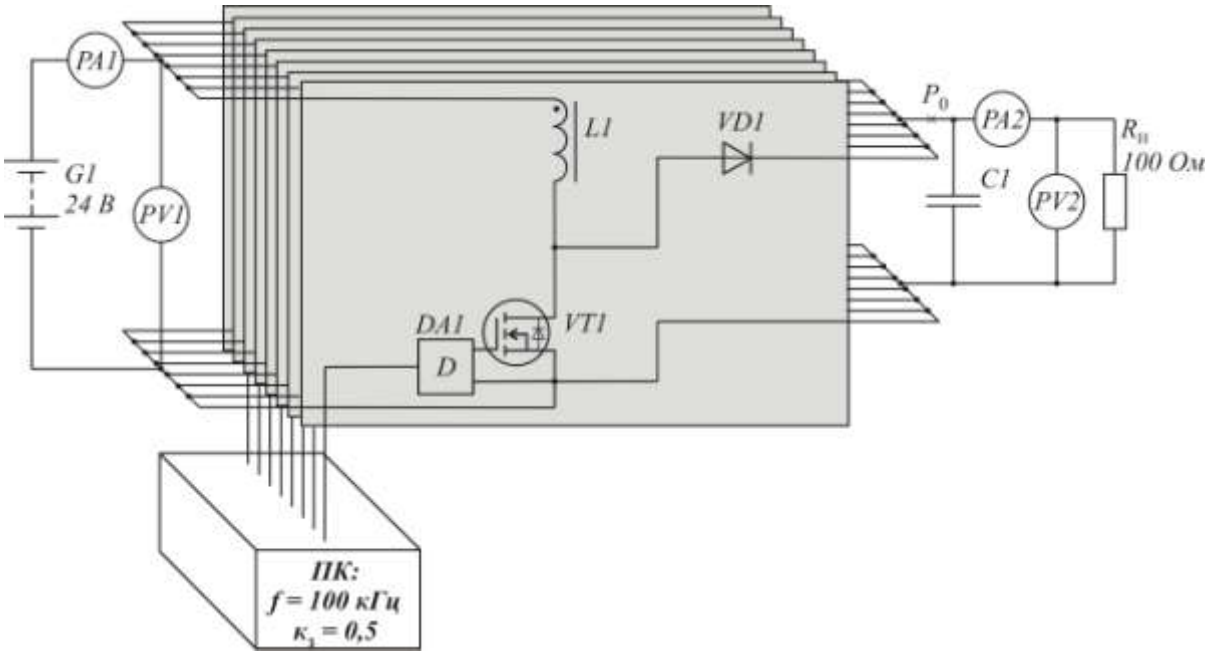


Рисунок 3.3 – Силові канали підвищувального типу (***y*** = 2)

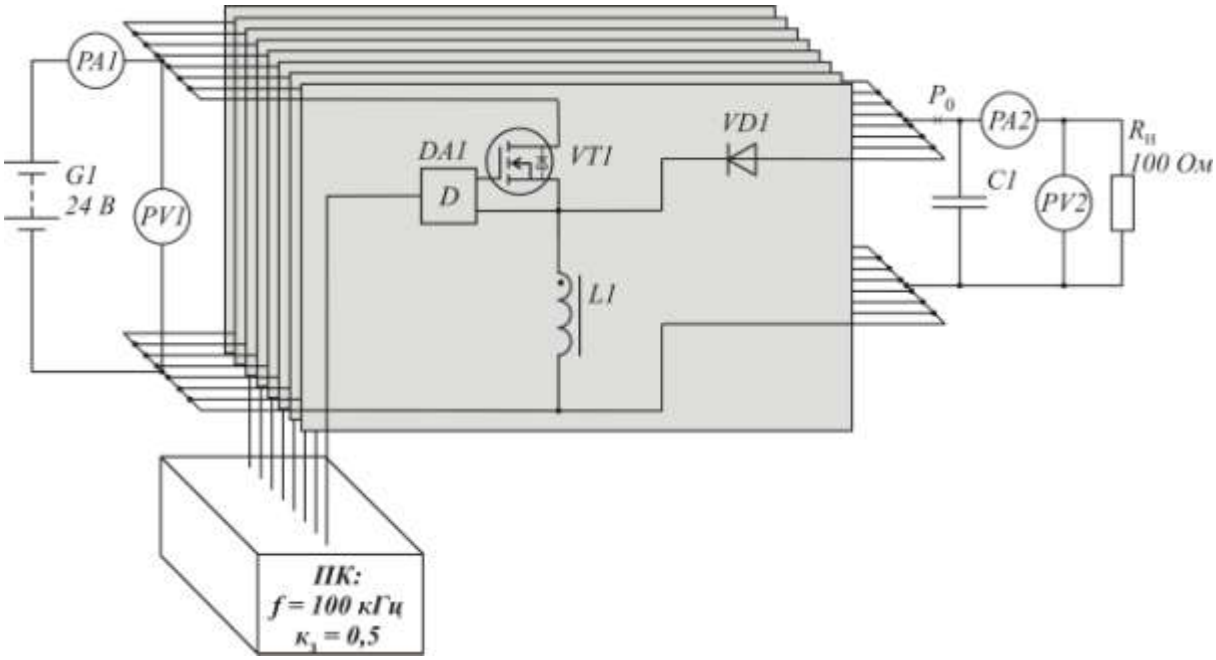


Рисунок 3.4 – Силові канали інвертувального типу (***y*** = 3)

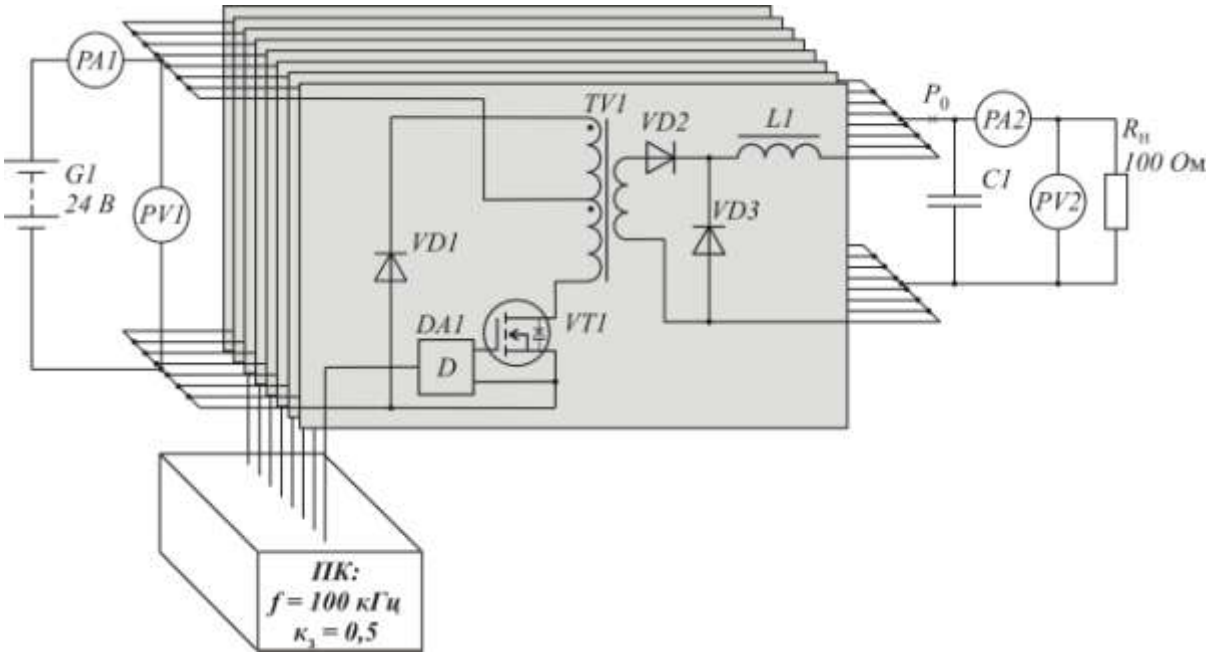


Рисунок 3.5 – Силові канали з прямим вмиканням діода (***y*** = 4)

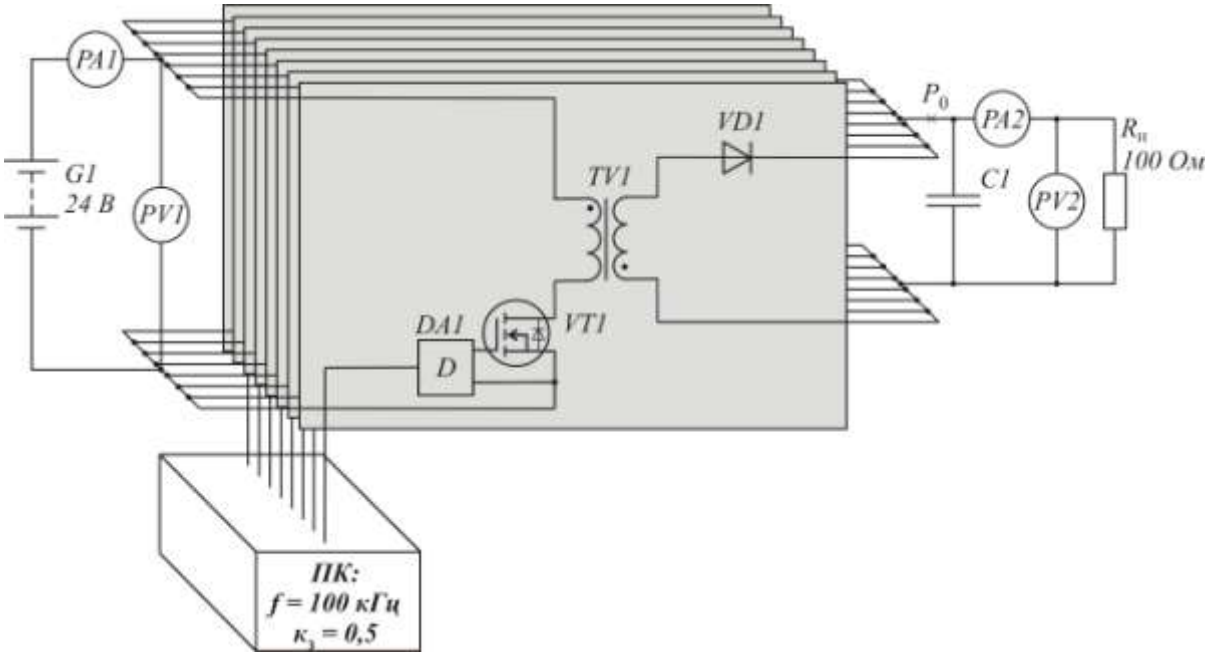


Рисунок 3.6 – Силові канали зі зворотним вмиканням діода (***y*** = 5)

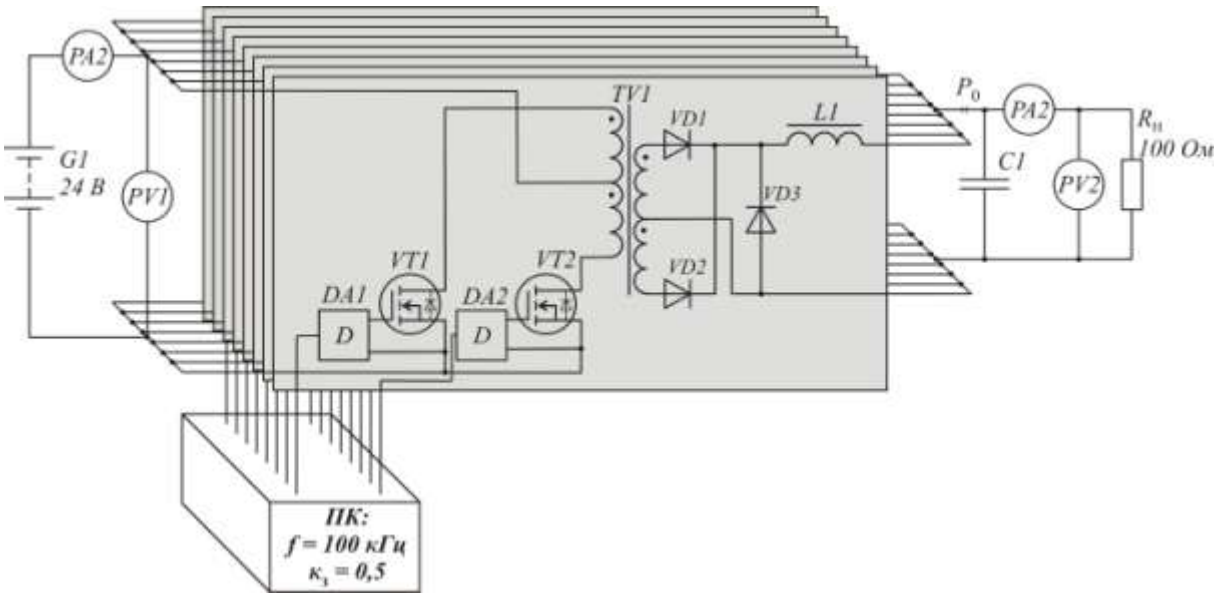


Рисунок 3.7 – Силові канали з виводом середньої точки трансформатора (***y*** = 6)

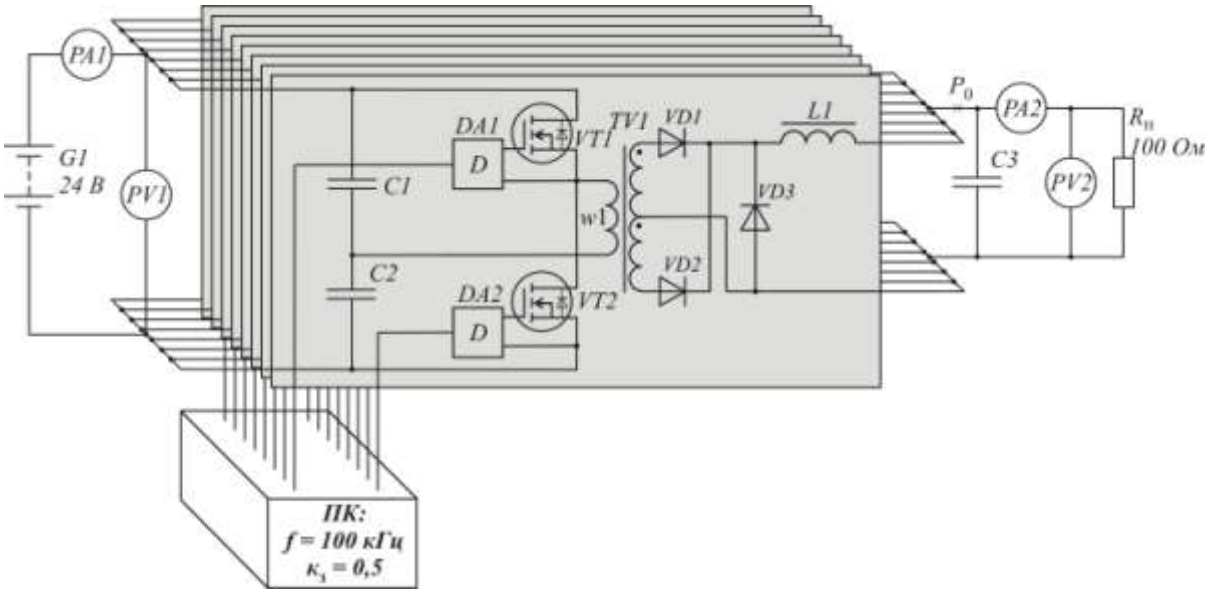


Рисунок 3.8 – Силові канали півмостового типу (***y*** = 7)

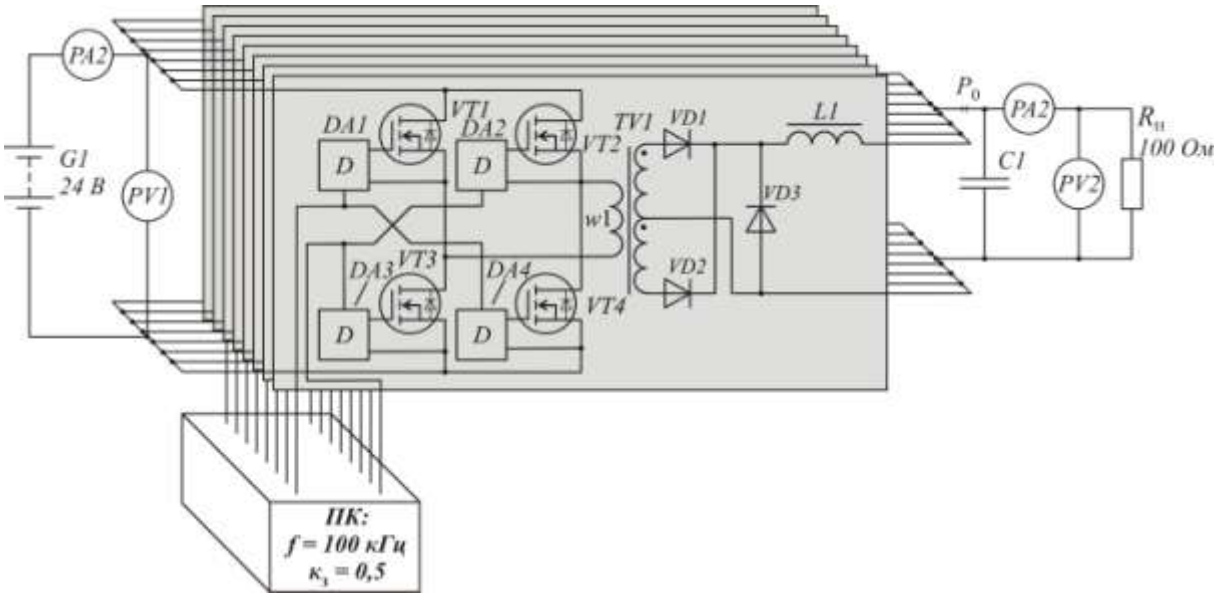


Рисунок 3.9 – Силові канали мостового типу (***y*** = 8)

Синхронізація осцилографа здійснюється автоматично, відповідно до роботи пристроя керування ***ПК***. Тому тривалість розгортки проградуйовано в частках періоду даного генератора і становить 0,1…100 періодів/екран. Список контрольних точок осцилографа наведено в табл. 3.3. Внутрішньої пам'яті осцилографа вистачає для зберігання останнього періоду моделювання.

Таблиця 3.2– **Склад лабораторного макета**

№ поз.	Тип елемента	Регульовані параметры				Примітка
		параметр	мін.	макс.	од. вим.	
G1	Джерело постійної напруги	Напруга	3	100	В	
		Внутрішній опір	1	100	мОм	
СК	Силовий канал	Індуктивність обмотки нагромадження	0,01	10	мГн	
		Коефіцієнт трансформації	0,1	10		Тільки для силових каналів, які містять трансформатор
C1	Конденсатор	Ємність	1	1000	мкФ	
$R_н$	Резистор	Опір	1	100	Ом	Оперативне регулювання
SW1	Вимикач	Стан	Вимк.	Вмк.		Вимикач навантаження
PV1	Вольтметр					Середнє значення
PV2	Вольтметр					Середнє значення
PA1	Амперметр					Середнє значення
PA2	Амперметр					Середнє значення
ПК	ШІМ-контролер	Частота	1	3000	кГц	
P_0	Контрольна точка	Коефіцієнт заповнювання	0,01	0,99		Оперативне регулювання

Таблиця 3.3 **– Досліджувані параметри**

Позначення	Параметри електричних процесів
1	**2**
G1, U	Напруга $u_ж(t)$ на виході джерела живлення ***G1***
G1, I	Струм $i_ж(t)$, споживаний від джерела живлення ***G1***
C1, U	Напруга $u_{c1}(t)$ на конденсаторі ***C1***
C1, I	Струм $i_{c1}(t)$ конденсатора ***C1***
R1, U	Напруга $u_н(t)$ на навантаженні
R1, I	Струм $i_н(t)$ навантаження
P_0***, U***	Напруга $u_{вих}(t)$ у вихідному колі пристрою (системи)
P_0***, I***	Струм $i_{вих}(t)$ у вихідному колі пристрою (системи)
Канал 1, Керування А	Напруга $u_{1А}(t)$ на виході **1А** пристроя керування ***ПК***

Продовження таблиці 3.3

1	2
Канал 1, $I_{вх}$	Струм $i_{ж1}(t)$, споживаний ***СК1*** від джерела ***G1***
Канал 1, $I_{вих}$	Струм $i_{н1}(t)$ у вихідному колі першого силового каналу ***ПК1***
Канал 1, Струм дроселя	Струм $i_{L1}(t)$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК1***
Канал 2, Керування А	Напруга $u_{2A}(t)$ на виході **2 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 2, Керування В	Напруга $u_{2B}(t)$ на виході **2 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 2, $I_{вх}$	Струм $i_{ж2}(t)$, споживаний ***СК2*** від джерела ***G1***
Канал 2, $I_{вих}$	Струм $i_{н2}(t)$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК2***
Канал 2, Струм дроселя	Струм $i_{L2}(t)$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК2***
Канал 3, Керування А	Напруга $u_{3A}(t)$ на виході **3 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 3, Керування В	Напруга $u_{3B}(t)$ на виході **3 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 3, $I_{вх}$	Струм $i_{ж3}(t)$, споживаний ***СК3*** від джерела ***G1***
Канал 3, $I_{вих}$	Струм $i_{н3}(t)$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК3***
Канал 3, Струм дроселя	Струм $i_{L3}(t)$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК3***
Канал 4, Керування А	Напруга $u_{4A}(t)$ на виході **4 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 4, Керування В	Напруга $u_{4B}(t)$ на виході **4 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 4, $I_{вх}$	Струм $i_{ж4}(t)$, споживаний ***СК4*** від джерела ***G1***
Канал 4, $I_{вих}$	Струм $i_{н4}(t)$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК4***
Канал 4, Струм дроселя	Струм $i_{L4}(t)$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК4***
Канал 5, Керування А	Напруга $u_{5A}(t)$ на виході **5 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 5, Керування В	Напруга $u_{5B}(t)$ на виході **5 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 5, $I_{вх}$	Струм $i_{ж5}(t)$, споживаний ***СК5*** від джерела ***G1***
Канал 5, $I_{вих}$	Струм $i_{н5}(t)$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК5***
Канал 5, Струм дроселя	Струм $i_5(t)$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК5***

Закінчення таблиці 3.3

1	2
Канал 6, Керування В	Напруга $\boldsymbol{u_{6B}(t)}$ на виході **6 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 6, $\boldsymbol{I_{вх}}$	Струм $\boldsymbol{i_{ж6}(t)}$**,** споживаний ***СК6*** від джерела ***G1***
Канал 6, $\boldsymbol{I_{вих}}$	Струм $\boldsymbol{i_{н6}(t)}$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК6***
Канал 6, Струм дроселя	Струм $\boldsymbol{i_6(t)}$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК6***
Канал 7, Керування А	Напруга $\boldsymbol{u_{7A}(t)}$ на виході **7 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 7, Керування В	Напруга $\boldsymbol{u_{7B}(t)}$ на виході **7 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 7, $\boldsymbol{I_{вх}}$	Струм $\boldsymbol{i_{ж7}(t)}$**,** споживаний ***СК7*** від джерела ***G1***
Канал 7, $\boldsymbol{I_{вих}}$	Струм $\boldsymbol{i_{н7}(t)}$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК7***
Канал 7, Струм дроселя	Струм $\boldsymbol{i_7(t)}$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК7***
Канал 8, Керування А	Напруга $\boldsymbol{u_{8A}(t)}$ на виході **8 А** пристроя керування ***ПК***
Канал 8, Керування В	Напруга $\boldsymbol{u_{8B}(t)}$ на виході **8 В** пристроя керування ***ПК***
Канал 8, $\boldsymbol{I_{вх}}$	Струм $\boldsymbol{i_{ж8}(t)}$**,** споживаний ***СК8*** від джерела ***G1***
Канал 8, $\boldsymbol{I_{вих}}$	Струм $\boldsymbol{i_{н8}(t)}$ у вихідному колі першого силового каналу ***СК8***
Канал 8, Струм дроселя	Струм $\boldsymbol{i_8(t)}$ дроселя ***L*** силового згладжувального фільтра ***СК8***

Опис пристроя керування

Пристрій керування являє собою багатоканальний контролер імпульсних сигналів з широтно-імпульсною модуляцією. На рис. 3.10 зображено вікно редагування параметрів пристроя керування. Редаговані параметри у списку можна поділити на дві категорії: спільні для всіх каналів та індивідуальні для кожного каналу.

До спільних параметрів належать: частота роботи, коефіцієнт заповнювання та амплітуда вихідних імпульсів, кількість фаз, а також вид виходу (однотактний чи двотактний).

Індивідуально для кожного каналу настроюються зсув відносно початку періоду (у відсотках) та відносне змінювання ширини імпульсів (щодо ширини, установленої коефіцієнтом заповнювання). Кожен канал можна також індивідуально вимикати.

Для редагування індивідуальних параметрів імпульсів каналу його потрібно попередньо обрати зі списку (див. рис. 3.10). Обраний канал змінить колір на діаграмі вихідних сигналів.

Рисунок 3.10 – Пристрій керування

Редагування параметрів силових каналів

Вікно редагування параметрів силових каналів подано на рис. 3.11. У верхній частині вікна редагування розташовано список силових каналів, а в нижній – параметри обраного зі списку силового каналу. У даному макеті доступні для редагування такі параметри як індуктивність дроселя та коефіцієнт трансформації трансформатора (для схем, у яких він є).

4 Домашнє завдання. Підготовка до роботи

4.1 Вивчити теоретичний матеріал за літературою [2.1...2.5] та методичними вказівками до даної лабораторної роботи:

- особливості структурної й функціональної побудови ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури;

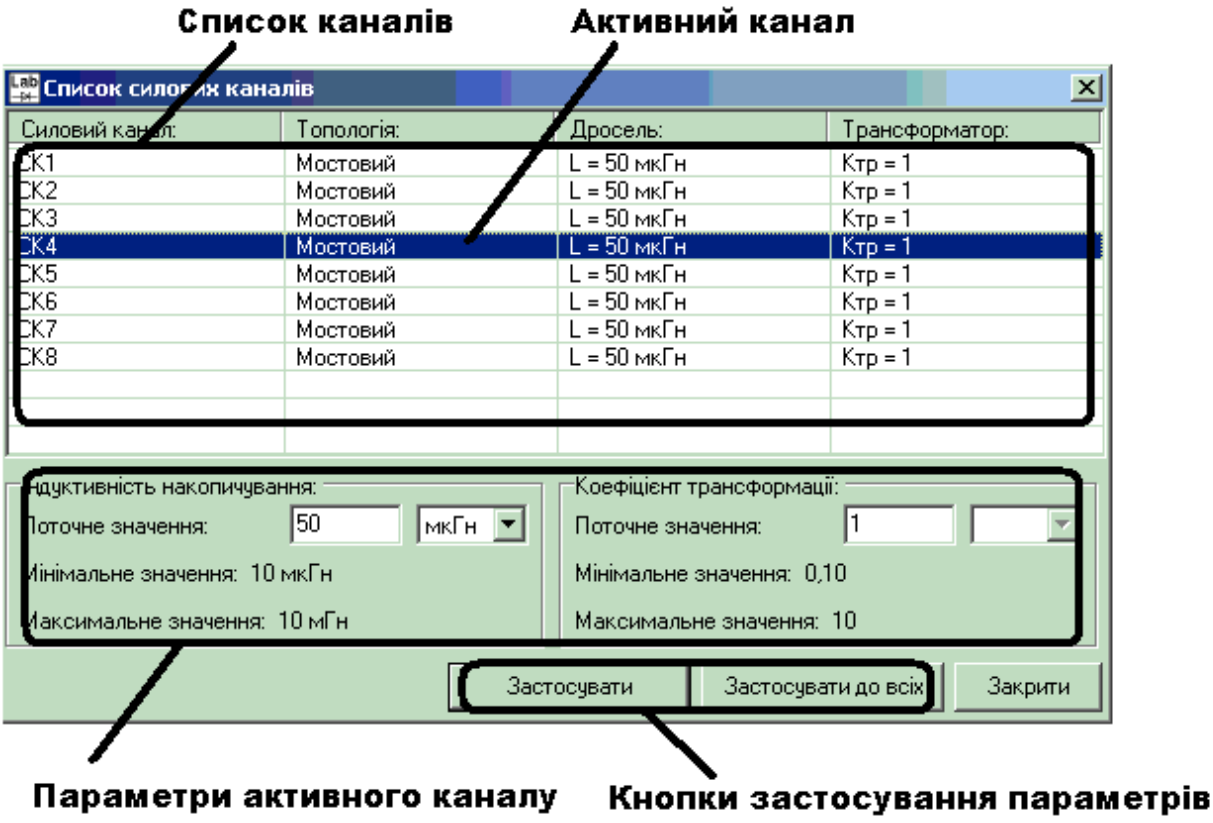


Рисунок 3.11 – Вікно редагування параметрів силових каналів

- деякі особливості й обмеження, накладувані на схемотехнічну реалізацію окремих функціональних вузлів ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури;
- процеси функціонування в ***ПЕЕ*** пристроїв та систем електроживлення модульної структури;
- особливості лабораторного макета (див. розд. 3).

4.2 Ознайомитися з методичними вказівками до даної лабораторної роботи.

4.3 Підготувати бланки звіту, де привести інформацію, потрібну, на думку студента, для подальшого виконування лабораторної роботи.

4.4 Усвідомити призначення кожного елемента перетворювача, мету кожного досліду, сподівані результати.

4.5 Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні запитання

5.1 З'ясуйте принципи побудови й особливості функціонування пристроїв і систем модульної структури.

5.2 Які є переваги та недоліки пристроїв та систем модульної структури?

5.3 З’ясуйте особливості функціонування імпульсних перетворювачів електричної енергії з однофазним та багатофазним режимами перетворювання.

5.4 Що являють собою зовнішня (навантажувальна) та регулювальна характеристики імпульсних перетворювачів?

5.5 Чому транзисторні перетворювачі постійного струму мають відносно високий к.к.д.?

5.6 З’ясуйте особливості функціонування імпульсних перетворювачів модульної структури (***ОІП*** та ***БІП***) за асиметрії електричних процесів у силових каналах ***СК***.

5.7 Де й для чого використовуються транзисторні перетворювачі електричної енергії (їхнє місце, призначення в апаратурі зв'язку)?

5.8 Зобразіть широко використовувані принципові схеми силових каналів ***СК*** перетворювачів електричної енергії. Охарактеризуйте переваги й недоліки кожної з наведених схем.

5.9 З’ясуйте призначення кожного елемента принципової електричної схеми лабораторного макета. Поясніть фізичні процеси, що відбуваються в елементах системи (кількість розглянутих елементів може бути обмежено викладачем).

5.10 Зобразіть діаграми струмів і напруг у колах, елементах схеми, зазначених викладачем.

5.11 Які показники якості схарактеризовують транзисторний перетворювач електричної енергії?

5.12 Поясніть амплітудні спектри (коефіцієнтів пульсацій), що ілюструють процеси за однофазного й багатофазного режимів перетворювання електричної енергії за симетрії та асиметрії електричних процесів у силових каналах ***СК***.

5.13 Як впливає частота перетворення на масогабаритні показники і к.к.д. перетворювача?

5.14 Поясніть потрібні й достатні умови забезпечення багатофазного режиму перетворювання електричної енергії одного (кількох) джерела (джерел) первинного електроживлення на електричну енергію для одного й для кількох автономних навантажень.

5.15 Яку роль у схемі перетворювача відіграє пристрій керування ***ПК***? Наведіть діаграми вихідних сигналів ***ПК***.

6 Лабораторне завдання. Зміст роботи

6.1 Вивчити теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури, а також процеси функціонування ***ПЕЕ*** з однофазним і багатофазним режи-

мами перетворювання електричної енергії за симетрії та асиметрії електричних процесів.

6.2 Дослідити схеми однофазних ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури з однофазним режимом перетворювання електричної енергії основних типів (***y*** = 1, 2, …, 8) схем силових каналів ***СК*** – з гальванічним зв'язком вхідних та вихідних кіл (однотактні ***СК***: знижувальний (***y*** = 1), підвищувальний (***y*** = 2), полярно-інвертувальний (***y*** = 3)), з гальванічним їхнім поділом (однотактні ***СК***: з прямим включенням діода (***y*** = 4), зі зворотним вмиканням діода (***y*** = 5); двотактні ***СК***: з виводом середньої точки трансформатора (***y*** = 6), мостової (***y*** = 7) і півмостової (***y*** = 8)).

6.2.1 Зняти зовнішні (навантажувальні) характеристики однофазних ***ПЕЕ***.

6.2.2 Визначити вихідні опори й відсоткові зниження вихідних напруг однофазних ***ПЕЕ***.

6.2.3 Визначити коефіцієнти корисної дії однофазних ***ПЕЕ***.

6.2.4 Дослідити регулювальні характеристики однофазних ***ПЕЕ***.

6.2.5 Дослідити фільтрувальні властивості однофазних ***ПЕЕ*** за симетрії та асиметрії електричних процесів у силових каналах ***СК***.

6.2.6 Дослідити процеси функціонування однофазних ***ПЕЕ***.

6.3 Дослідити схеми багатофазних ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури з багатофазним режимом перетворювання електричної енергії для восьми типів (***y*** = 1, 2, …, 8) силових каналів ***СК*** (однотактні ***СК***: знижувальний (***y*** = 1), підвищувальний (***y*** = 2), полярно-інвертувальний (***y*** = 3), з прямим вмиканням діода (***y*** = 4), зі зворотним вмиканням діода (***y*** = 5); двотактні ***СК***: з виводом середньої точки трансформатора (***y*** = 6), мостової (***y*** = 7) і півмостової (***y*** = 8)).

6.3.1 Зняти зовнішні (навантажувальні) характеристики багатофазних ***ПЕЕ***.

6.3.2 Визначити вихідні опори й відсоткові зниження вихідних напруг багатофазних ***ПЕЕ***.

6.3.3 Визначити коефіцієнти корисної дії багатофазних ***ПЕЕ***.

6.3.4 Дослідити регулювальні характеристики багатофазних ***ПЕЕ***.

6.3.5 Дослідити фільтрувальні властивості багатофазних ***ПЕЕ*** за симетрії та асиметрії електричних процесів у силових каналах ***СК***.

6.3.6 Дослідити процеси функціонування багатофазних ***ПЕЕ***.

6.4 Виконати аналіз і сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

Методика виконання

7.1 До пункту 6.1. Програма й порядок вивчення теоретичних питань.

Вивчити призначення, особливості структурної, функціональної, схемотехнічної побудови ***ПЕЕ*** – пристроїв та систем електроживлення модульної структури – і процеси їхнього функціонування з однофазним та багатофазним режимами перетворювання електричної енергії за [2.1…2.5] і матеріалами даної лабораторної роботи. Вивчити особливості схемотехничного виконання лабораторного макета (див. розд. 3).

Одержати у викладача контрольні запитання щодо вивченого матеріалу і підготувати відповіді на них. Уточнити у викладача форму й обсяг їхнього подавання у звіті.

ПРИМІТКА. Не припускається подальше виконування роботи без дозволу викладача. Неодмінною умовою допуску до виконування роботи є з'ясування особливостей схемотехнічного виконання лабораторного макета.

*7.2 До пункту 6.2. Дослідження однофазних **ПЕЕ** – пристроїв (систем) електроживлення модульної структури з однофазним режимом перетворювання електричної енергії для восьми типів (**y** = 1, 2, …, 8) силових каналів (однотактні **СК**: знижувальний (**y** = 1), підвищувальний (**y** = 2), полярно-інвертувальний (**y** = 3), з прямим вмиканням діода (**y** = 4), зі зворотним вмиканням діода (**y** = 5); двотактні **СК**: з виводом середньої точки трансформатора (**y** = 6), мостові (**y** = 7) і півмостові – **y** = 8).*

Для забезпечення однофазного режиму перетворювання ***ПЕЕ*** слід виконати редагування параметрів пристроя керування ***ПК***, використовуючи кнопку **"*ПК*"** на панелі елементів (див. рис. 3.1). З появою вікна редагування параметрів пристроя керування ***ПК*** (див. рис. 3.10) відредагувати (після узгодження з викладачем) параметри пристроя керування. Однофазний режим функціонування восьми силових каналів ***СК*** забезпечується встановлюванням кількості фаз (**"Кількість фаз:"** – див. рис. 3.10) рівним 1 (за багатофазного режиму – 2, 3, … ,8). Симетрія електричних процесів у силових каналах забезпечується встановленням параметрів у силових каналах ***СК*** (**"Канал 1", …, "Канал 8"**) відхилень тривалості $\Delta\,\mathbf{t_{ik}}$ імпульсів (**"Тривалість імпульсу: 0 %"**) і часового $\Delta\,\mathbf{t_{ck}}$ зсуву (**"Зсув імпульсу: 0 %"**) **k**-го силового каналу ***СК*** рівними **0 %**. За асиметрії електричних процесів у ***СК*** зазначені відхилення є відмінні від нульових значень ($\Delta\,\mathbf{t_{ik}} \neq \mathbf{0}$, $\pm\,\Delta\,\mathbf{t_{dk}} \neq \mathbf{0}$). Зазначені відхилення, частота $\boldsymbol{f_{ПК}}$ роботи й коефіцієнт $\mathbf{к_з}$ заповнювання задаються викладачем.

Вибір потрібної схеми дослідження ***ПЕЕ*** й типу силового каналу здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для редагування параметрів силових каналів ***СК*** слід використовувати вікно редагування – див. рис. 3.11 (для його появи використати кнопку "***СК***" – див. рис. 3.1).

7.2.1 До пункту 6.2.1. Дослідження зовнішніх характеристик однофазних ***ПЕЕ.***

Зовнішня характеристика – це залежність $U_н = f(I_н)$ напруги на навантаженні $U_н$ від струму $I_н$. При знятті зовнішньої характеристики значення коефіцієнта заповнювання $к_з$ пристрою керування ***ПК*** задає викладач.

Поступово збільшуючи струм навантаження до максимального значення, зафіксувати у всьому діапазоні змінювання струму $I_н$ навантаження 5...7 його значень, що рівномірно розбивають діапазон вимірювань. Виміряти за цих значень струму $I_н$ величини $I_ж$, $U_ж$, $U_н$. Задані значення занести до табл. 7.1 (y), де y – тип силового каналу ***СК*** ($y = 1, 2, …, 8$).

Методика визначання зовнішньої характеристики є така:

- установити потрібне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання вихідних напруг ($u_{1А}(t)$, $u_{1В}(t)$, …, $u_{8А}(t)$, $u_{8В}(t)$) пристрою керування ***ПК*** (використовуючи орган регулювання – повзунок "***ПК***" коефіцієнт $к_з$ – див. рис. 3.1);
- вимкнути навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до розімкненого непровідного стану;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **"Старт";**
- зняти показання вольтметрів ***PV1, PV2***: відповідно напруги $U_ж$ на виході джерела ***G1*** та $U_{н\ нс}$ – напруги ненавантаженого стану перетворювача. Результат занести до табл. 7.1 (y);
- підімкнути опір $R_н$ навантаження, перевівши вимикач ***SW1*** до замкненого провідного стану;
- змінюючи (використовуючи орган регулювання – повзунок "$R_н$") (див. рис. 3.1) опір $R_н$ навантаження від максимуму (мінімуму) до мінімуму (максимуму) (наприклад, $R_н$ = 1, 2, 5, 10, 25, 50 та 100 Ом), зняти зовнішню характеристику. Результати (показання $U_ж$, $U_н$ та $I_ж$ та $I_н$ відповідно вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2***) занести до таблиці 7.1 (y);
- за результатами дослідження побудувати зовнішню характеристику.

7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначення вихідних опорів і відсоткових знижень вихідних напруг однофазних ***ПЕЕ.***

Вихідний опір $r_{пер}$ перетворювача визначається з використанням дослідних даних таблиць 7.1 (y):

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н; \quad \Delta U_н = (U_{н\ max} - U_н); \quad \Delta I_н = (I_{н\ max} - I_н),$$

де $U_{н\ max}$, $I_{н\ max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження (див. табл. 7.1 (y)). Результати розрахунків $\Delta U_н$, $\Delta I_н$, $r_{пер}$ занести до табл. 7.1 (y).

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги перетворювача при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\,нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\,ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\,нс} - U_{н\,ном}}{U_{н\,нс}} \cdot 100\%.$$

Таблиця 7.1 (***у***) – **Результати досліджень *ПЕЕ* модульної структури**

№ вим.	Дослідні дані					Розрахункові дані				
	$I_н$, А	$U_н$, В	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$\Delta U_н$, В	$\Delta I_н$, А	$r_{пер}$, Ом	$P_ж$, Вт	$P_н$, Вт	η, %
1 Однофазний *ПЕЕ*										
1.1 1.2 …										
2 Багатофазний *ПЕЕ*										
2.1 2.2 …										

*7.2.2 До пункту 6.2.2. Визначення вихідних опорів і відсоткових знижень вихідних напруг однофазних **ПЕЕ**.*

Вихідний опір $r_{пер}$ перетворювача визначається з використанням дослідних даних таблиць 7.1 (***у***):

$$r_{пер} = \Delta U_н / \Delta I_н; \quad \Delta U_н = (U_{н\,max} - U_н); \quad \Delta I_н = (I_{н\,max} - I_н), \quad (7.1)$$

де $U_{н\,max}$, $I_{н\,max}$ – максимальні значення відповідно напруги й струму навантаження (див. табл. 7.1 (***у***)). Результати розрахунків $\Delta U_н$, $\Delta I_н$, $r_{пер}$ занести до табл. 7.1 (***у***).

Відсоткове зниження $\Delta U_{н\%}$ вихідної напруги перетворювача при переході від ненавантаженого стану з напругою $U_{н\,нс}$ до номінального навантаження з вихідною напругою $U_{н\,ном}$ визначається у вигляді

$$\Delta U_{н\%} = \frac{U_{н\,нс} - U_{н\,ном}}{U_{н\,нс}} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

*7.2.3 До пункту 6.2.3. Визначення коефіцієнтів корисної дії однофазних **ПЕЕ**.*

Коефіцієнт корисної дії **η** (див. табл. 7.1 (***у***)) однофазного ***ПЕЕ*** визначається з використовуванням дослідних даних таблиці 7.1 (***у***) через значення активних потужностей на виході $P_н$ ($P_н = I_н U_н$) і вході $P_ж$ ($P_ж = I_ж U_ж$) перетворювача:

$$\eta = (P_н / P_ж) \cdot 100\ \%. \quad (7.3)$$

*7.2.4 До пункту 6.2.4. Побудова регулювальних характеристик однофазних **ПЕЕ**.*

Регулювальна характеристика $U_н = f(к_з)$ – це залежність вихідної напруги $U_н$ перетворювача від коефіцієнта $к_з$ заповнювання вихідних сигналів пристрою керування ***ПК***. При знятті характеристик опір навантаження задає викладач.

Для зняття регулювальних характеристик слід виконати таке:

- установити потрібний опір $R_н$ навантаження;
- установити мінімальне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання;
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”**;
- змінюючи коефіцієнт $к_з$ заповнювання, зняти регулювальну характеристику. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

Таблиця 7.2(*y*) – **Результати вимірювань**

Тип *СК*	**$к_з$**	**0,01**	**0,1**	**0,25**	**0,5**	**0,75**	**0,9**	**0,99**
1 Однофазні ПЕЕ								
***y* = 1**	***$U_н$, В***							
***y* = 2**	***$U_н$, В***							
……...								
***y* = 8**	**$U_н$, В**							
2 Багатофазні ПЕЕ								
***y* = 1**	***$U_н$, В***							
***y* = 2**	***$U_н$, В***							
…….....								
***y* = 8**	**$U_н$, В**							

*7.2.5 До пункту 6.2.5. Дослідження фільтрувальних властивостей **ПЕЕ** модульної структури.*

Дослідження показників якості фільтрувальних властивостей імпульсних ***ПЕЕ*** модульної структури здійснюється з урахуванням викладеного в частині 1 «Методичний посібник».

Для вимірювання параметрів змінних складових у колі живлення ***ПЕЕ*** (на виході джерела живлення ***G1***) – частоти $f_{жu}$ і розмаху $\Delta U_{жу}$ напруги $u_ж(t)$, частоти $f_{жі}$ і розмаху $\Delta I_{жу}$ струму $i_ж(t)$, споживаного ***ПЕЕ*** – слід підмикати (див. рис. В.13 розд. В.1) осцилограф до контрольних точок: у першому випадку – до “***G1,U***” – вихідне коло джерела ***G1*** (коло живлення ***ПЕЕ***), а в другому – до “***G1,I***” (струм $i_ж(t)$ – див. табл. 3.3).

Для вимірювання параметрів змінних складових у вихідному колі ***ПЕЕ –*** частоти $f_{нu}$ і розмаху $\Delta U_{ну}$ напруги $u_{вих}(t)$, частоти $f_{ні}$ і розмаху $\Delta I_{ну}$ струму $i_{вих}(t)$ – слід підмикати осцилограф (див. рис. В.13 розд. В.1) до ко-

нтрольних точок: у першому випадку – до "P_0,U" (напруга $u_{вих}(t)$ – див. табл. 3.3), а в другому – до "P_0,I" (струм $i_{вих}(t)$ – див. табл. 3.3).

Для вимірювання параметрів розмаху ΔI_R і частоти f змінної складової струму $i_н(t)$ у колі опору $R_н$ навантаження ***ПЕЕ*** слід підімкнути осцилограф до контрольної точки "R,I" (струм $i_н(t)$ навантаження).

Експериментальні значення частот $f_{жи}$, $f_{жі}$, $f_{ни}$, $f_{ні}$, f досліджуваних електричних процесів визначаються за осцилограмами відповідно $u_ж(t)$, $i_ж(t)$, $u_{вих}(t)$, $i_{вих}(t)$, $i_н(t)$. Для цього слід виміряти за маскою осцилографа тривалість періоду T кривої, яка спостерігається, використовуючи значення величини n множника **"Час/Поділка"** однойменного перемикача осцилографа. Вимірюваний часовий інтервал визначається добутком двох величин: довжини l вимірюваного інтервалу часу на екрані за горизонталлю в поділках і значення величини n часу на поділку у певному положенні перемикача **"Час/Поділка".** У даному разі

$$f = 1/T = 1/(lr).$$

Осцилограф використовується в режимі закритого входу (вимикач постійної складової ***ПС*** вимкнено – див. рис. В.13 розд. В.1) підсилювача вертикального посилювання.

Методика дослідження фільтрувальних властивостей імпульсних ***ПЕЕ*** модульної структури припускає виконування таких кроків (результати вимірювань занести до табл. 7.3 (***у***)):

- відредагувати параметри джерела ***G1*** (напруга $U_{G1} = U_{G1\ ном}$, вихідний опір $r_1 = r_{1\ ном}$), використовуючи кнопку ***"G1"*** на панелі елементів (див. рис. 3.1);
- відредагувати параметри пристрою керування ***ПК*** (див. рис. 3.10);
- установити потрібну частоту $f_{ПК}$ роботи ***ПК***;
- установити потрібне значення коефіцієнта $к_з$ заповнювання вихідних напруг ($u_{1А}(t)$, $u_{1В}(t)$, …, $u_{8А}(t)$, $u_{8В}(t)$) пристрою керування ***ПК***;
- установити потрібні параметри сигналів керування кожним із силових каналів ***СК*** (**"Параметри каналу:"**) – відхилення у відсотках тривалості Δt_{ik} і зсуву Δt_{ck} імпульсів (за симетричного режиму зазначені відхилення дорівнюють нулю, за асиметрії – відмінні від нульових значень – можуть досягати ±30 %);
- відредагувати параметри силових каналів ***СК*** – значення індуктивності ΔL_k дроселя фільтра та коефіцієнти $\Delta K_{тр}$ трансфор-

мації трансформатора ***k***-го ***СК*** (за симетричного режиму вони є ідентичні, за асиметрії – неідентичні);

- установити опір $R_н = R_{н\ ном}$ у колі навантаження ***ПЕЕ***, використовуючи орган регулювання – повзунок “ $R_н$” (див. рис. 3.1);
- розпочати моделювання, натиснувши кнопку **“Старт”** (див рис. 3.1);

- зняти показання вольтметрів ***PV1, PV2*** та амперметрів ***PA1, PA2***. Результати вимірювань $U_ж$, $U_н$ та $I_ж$, $I_н$ занести до табл. 7.3 (***y***);
- виміряти розмах $\Delta U_{жу}$ та частоту $f_{жі}$ пульсації напруги в колі живлення – вхідного кола ***ПЕЕ*** – за осцилограмою напруги $u_ж(t)$ (контролюючи точки ***G1, U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{жу}$ й частоту $f_{жі}$ пульсації струму в колі живлення – вхідного кола ***ПЕЕ*** – за осцилограмою $i_ж(t)$ (***G1, I***);
- виміряти розмах $\Delta U_{ну}$ та частоту $f_{ні}$ пульсації напруги в колі навантаження ***ПЕЕ*** за осцилограмою напруги $u_н(t)$ (контрольна точка P_0, ***U*** відповідно до табл. 3.3);
- виміряти розмах $\Delta I_{ну}$ та частоту $f_{ні}$ пульсації струму у вихідному колі навантаження ***ПЕЕ*** за осцилограмою $i_{вих}(t)$ (P_0, ***I*** – див. табл. 3.3);
- виміряти ΔI_R і частоту Δf пульсації струму в опорі $R_н$ за осцилограмою струму $i_н(t)$ (***R1, I*** – див. табл. 3.3);

- дослідження за даною методикою виконується для симетричного режиму роботи, коли відхилення Δ параметрів силових каналів дорівнюють нулю ($\Delta = 0$ – результати досліджень занести до табл. 7.3 (***y***) – пп. 1.1 (***ОІП***) та 2.1 (***БІП***)) і за асиметрії електричних процесів в одному, двох і т. д. силових каналах, одного, двох і т. д. параметрів (погоджується з викладачем) – за відхилень тривалості $\pm\Delta t_{ik}$, часового зсуву $\pm\Delta t_{ck}$ сигналів керування ***ПК***, індуктивності $\pm\Delta L_k$ дроселя силового згладжувального фільтра, коефіцієнта $\pm\Delta K_{тр}$ трансформації трансформатора ***СК*** (результати досліджень значень занести до таблиці 7.3 (***y***) – пп. 1.2, …, 1.5 (***ОІП***) і 2.2, ..., 2.5 (***БІП***)).

Використовуючи результати експерименту (див. табл. 7.3 (***y***)), розрахувати й заповнити таблицю 7.4 (***y***) з урахуванням наведених далі співвідношень.

Таблиця 7.3 (***у***) – **Результати досліджень *ПЕЕ***

№ вим.	Експериментальна частина																
	Режим	Вимкнений параметр	$к_з$	$U_ж$, В	$I_ж$, А	$U_н$, В	$I_н$, А	$\Delta U_{жу}$, В	$\Delta U_{ну}$, В	$\Delta I_{жу}$, А	$\Delta I_{ну}$, А	ΔI_R, А	$f_{жі}$, кГц	$f_{жи}$, кГц	$f_{ни}$, кГц	f, кГц	$f_{ні}$, кГц
1.1	ОІП	$\Delta = 0$															
1.2	ОІП	$\Delta t_{ik} =$															
…….....																	
1.5	ОІП	$K_{трk} =$															
2.1	БІП	$\Delta = 0$															
2.2	БІП	$\Delta t_{ik} =$															
……...																	
2.5	БІП	$K_{трk} =$															
…….....																	

Результати експерименту дозволяють визначити коефіцієнти пульсацій і нормовані частоти:

$$\overline{f}_{жі} = f_{жі} / f_{ПК}; \quad \overline{f}_{ні} = f_{ні} / f_{ПК};$$

Коефіцієнти пульсацій на вході (струму $K_{пж}$ і напруги $K_{пжU}$), на виході (струму $K_{пн}$ і напруги $K_{пнU}$) у колі навантаження (струму $K_{пнR}$) перетворювача модульної структури розраховуються у вигляді

$$K_{пж} = \frac{\Delta I_{пж}}{2I_п}; \quad K_{пн} = \frac{\Delta I_н}{2I_н}, \; K_{пнR} = \frac{\Delta I_R}{2I_н};$$

$$K_{пжU} = \frac{\Delta U_{жу}}{2U_ж}; \quad K_{пнU} = \frac{\Delta U_{ну}}{2U_н}.$$

*7.2.6 До пункту 6.2.6. Дослідження процесів функціонування однофазних **ПЕЕ**.*

Осцилограми спостережуваних електричних процесів слід зображувати на інтервалі 1,5...2 періоду, зберігаючи їхні амплітудні та часові співвідношення.

Спостерігати й зарисувати осцилограми електричних процесів в елементах та колах перетворювача електричної енергії слід відповідно до табл. 3.3 за симетрії та асиметрії електричних процесів п. 7.2.5:

Таблиця 7.4 (***y***) – **Результати досліджень *ПЕЕ***

№ вим.	Розрахункові дані																	
	Режим	Вимкнений параметр	$\overline{f}_{жu}$	$\overline{f}_{нu}$	$\overline{f}_{жi}$	$\overline{f}_{нi}$	$\overline{f}_{R}$	$K_{пж}$	$K_{пн}$	$K_{пжU}$	$K_{пнU}$	$K_{п}$	$S_{бж}$	$S_{бн}$	$S_{бжU}$	$S_{бнU}$	$S_{б}$
1.1	***ОІП***	$\Delta = 0$															
1.2	***ОІП***	$\Delta t_{ik}=$															
…….																	
1.5	***ОІП***	$K_{трk} =$															
2.1	***БІП***	$\Delta = 0$															
2.2	***БІП***	$\Delta t_{ik} =$															
…….....																	
2.5	***БІП***	$K_{трk} =$															

- напруги $u_{k\text{А}}(t)$, $u_{k\text{В}}(t)$ на виходах **А** й **В** пристрою керування ***ПК*** у ***k***-тому ***ПК***;
- напруга $u_{ж}(t)$ та струм $i_{ж}(t)$ у колі живлення ***ПЕЕ***;
- напруга $u_{вих}(t)$ та струм $i_{вих}(t)$ у вихідному колі ***ПЕЕ***;
- струм $i_{C1}(t)$ конденсатора ***C1***;
- змінна складова напруги $u_{н}(t)$ та струму $i_{н}(t)$ у колі опору $R_{н}$ навантаження ***ПЕЕ***.

Діаграми треба зобразити в одному масштабі по горизонталі.

*7.3 До пункту 6.3. Дослідження багатофазних **ПЕЕ** – пристроїв (систем) електроживлення модульної структури з багатофазним режимом перетворювання електричної енергії для восьми типів (**y** = 1, 2, …, 8) силових каналів (однотактні **СК**: знижувальний (**y** = 1), підвищувальний (**y** = 2), полярно-інвертувальний (**y** = 3), з прямим вмиканням діода (**y** = 4), зі зворотним вмиканням діода (**y** = 5); двотактні **СК**: з виводом середньої точки трансформатора (**y** = 6), мостові (**y** = 7) і півмостові (**y** = 8)).*

Для забезпечення багатофазного режиму перетворювання ***ПЕЕ*** слід виконати редагування параметрів пристроя керування ***ПК,*** використовуючи кнопку **"*ПК*"** на панелі елементів (див. рис. 3.1). З появою вікна редагування параметрів пристроя керування ***ПК*** (див. рис. 3.10) відредагувати (після узгодження з викладачем) параметри пристроя керування.

Багатофазний режим функціонування восьми силових каналів ***СК*** забезпечується встановленням кількості фаз (**"Кількість фаз:"** – див. рис. 3.10) рівним 2, 3, …, 8.

Симетрія електричних процесів у силових каналах забезпечується встановленням параметрів у силових каналах ***СК*** (**"Канал 1", …, "Канал**

8”) відхилень тривалості Δt_{ik} імпульсів (**“Тривалість імпульсу: 0 %”**) і часового Δt_{ck} зсуву (**“Зсув імпульсу: 0 %”**) ***k***-того силового каналу ***СК*** рівними **0%**.

За асиметрії електричних процесів у ***СК*** зазначені відхилення є відмінні від нульових значень ($\Delta t_{ik} \neq 0$, $\pm \Delta t_{ck} \neq 0$). Зазначені відхилення, частота $f_{ПК}$ роботи та коефіцієнт $к_з$ заповнювання задаються викладачем. Вибір потрібної схеми дослідження ***ПЕЕ*** і типу силового каналу здійснюється за допомогою перемикача вибору схеми дослідження (див. рис. 3.1).

Для редагування параметрів силових каналів ***СК*** використовується вікно редагування – див. рис. 3.11 (для його появи використовувати кнопку **“ПК”** – див. рис. 3.1).

*7.3.1 До пункту 6.3.1. Дослідження зовнішніх характеристик багатофазних **ПЕЕ**.*

Дослідження зовнішніх характеристик багатофазних ***ПЕЕ*** здійснюється відповідно до п. 7.2.1 за таких самих параметрів ***СК*** та режимів роботи, за яких досліджувалися й однойменні однофазні ***ПЕЕ***.

*7.3.2 До пункту 6.3.2. Визначення вихідних опорів та відсоткових знижень вихідних напруг багатофазних **ПЕЕ**.*

Вихідний опір $r_{пер}$ і відсоткові зниження вихідних напруг багатофазного ***ПЕЕ*** визначаються відповідно до співвідношень (7.1) та (7.2) з використанням дослідних даних таблиці 7.1 **(*у*)**.

Результати розрахунків $\Delta U_н$, $\Delta I_н$, $r_{пер}$ занести до табл. 7.1 **(*у*)**.

*7.3.3 До пункту 6.3.3. Визначення коефіцієнтів корисної дії багатофазних **ПЕЕ**.*

Коефіцієнт корисної дії **η** (див. табл. 7.1 **(*у*)**) перетворювача визначається у відповідності зі співвідношенням (7.3) з використанням дослідних даних таблиці 7.1 **(*у*)** через значення активних потужностей на виході $P_н$ **(**$P_н = I_н U_н$**)** і на вході $P_ж$ **(**$P_ж = I_ж U_ж$**)** багатофазного **ПЕЕ**. Результати розрахунків занести до таблиці 7.1 **(*у*)**.

*7.3.4 До пункту 6.3.4. Дослідження регулювальних характеристик багатофазних **ПЕЕ**.*

Регулювальна характеристика $U_н = f(к_з)$ – це залежність вихідної напруги $U_н$ перетворювача від коефіцієнта $к_з$ заповнювання пристрою керування ***ПК***. Дослідження регулювальних характеристик здійснюється відповідно до п. 7.2.4 за таких самих параметрів силових каналів ***СК*** та режимів роботи, за яких досліджувалися однойменні однофазні **ПЕЕ**.

*7.3.5 До пункту 6.3.5. Дослідження фільтрувальних властивостей багатофазних **ПЕЕ**.*

Дослідження фільтрувальних властивостей багатофазних ***ПЕЕ*** здійснюється відповідно до п. 7.2.5 за таких самих параметрів ***СК*** і режимів роботи, за яких досліджувалися однойменні однофазні ***ПЕЕ.***

Коефіцієнти згладжування перетворювачів модульної структури на виході $S_{бж}$, $S_{бжU}$, виході $S_{бн}$, $S_{бнU}$ й у колі опору навантаження $S_{бR}$ визначаються з урахуванням коефіцієнтів (див. п. 1.1 табл. 7.4 **(*у*)**) пульсації однофазного режиму функціонування ***ПЕЕ*** за симетрії (за $\Delta = 0$) електричних процесів, тобто

$$\left.\begin{array}{ll} \textbf{за струмом} & S_{бж} = \dfrac{K_{пжо}}{K_{пж}}; \quad S_{бн} = \dfrac{K_{пно}}{K_{пн}}; \quad S_{бR} = \dfrac{K_{пRо}}{K_{пR}}; \\ \textbf{за напругою} & S_{бжU} = \dfrac{K_{пжUо}}{K_{пжU}}; \quad S_{бнU} = \dfrac{K_{пнUо}}{K_{пнU}}; \quad S_{бRU} = \dfrac{K_{пRUо}}{K_{пRU}}; \end{array}\right\}$$

$$K_{пжо} = K_{пж} \text{ за } \Delta = 0; \quad K_{пжUо} = K_{пжU} \text{ за } \Delta = 0; \quad K_{пн} = K_{пн} \text{ за } \Delta = 0;$$

$$K_{пнUо} = K_{пнU} \text{ за } \Delta = 0; \quad K_{пRо} = K_{пR} \text{ за } \Delta = 0,$$

де $K_{пжо}$, $K_{пно}$, $K_{пRо}$, ($K_{пжU}$, $K_{пнU}$, $K_{пRU}$,) – коефіцієнти пульсації струмів (напруг) відповідно на вході, виході й у колі опору навантаження з однофазним режимом перетворювання за симетрії електричних процесів.

7.3.6 До пункту 6.3.6. Дослідження процесів функціонування багатофазних ***ПЕЕ.***

Дослідження процесів функціонування багатофазних ***ПЕЕ*** здійснюється відповідно до п. 7.2.6 за таких самих параметрів ***СК*** та режимів роботи, за яких досліджувалися однойменні однофазні ***ПЕЕ.***

До пункту 6.4. Висновки за результатами роботи. Оформлення звіту з урахуванням вимог розділу 6 даної методичної розробки.

Висновки щодо виконаної роботи мають містити стисло й чітко сформульовані положення, у яких розкрито сутність спостережуваних явищ чи здобуваних графічних залежностей. Висновки повинні не констатувати зовнішні ознаки, а пояснювати їх, установлюючи єдність теорії й експерименту, пояснюючи принципову відмінність одного випадку від іншого.

У висновках має відбитися осмислення результатів лабораторного дослідження. Поміж відповідями на контрольні запитання й висновками щодо роботи є безпосередній зв'язок. Опрацьовування контрольних запитань надасть змогу його виявити. Висновки не повинні повторювати зміст роботи (розділ 6).

8 Зміст звіту

Звіт повинен містити:

8.1 принципову схему перетворювача модульної структури;

8.2 таблиці вимірювань та обчислень;

8.3 графіки робочих характеристик перетворювача

$$U_н, P_н, r_{пер}, f(I_н), U_н = f(к_з),$$

виконані в єдиній координатній системі;

8.4 осцилограми досліджуваних напруг та струмів елементів імпульсних ***ПЕЕ*** модульної структури за однофазного й багатофазного режимів перетворювання за симетрії та асиметрії електричних процесів;

8.5 висновки з аналізу досліджуваних характеристик ***ПЕЕ*** модульної структури.

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций В.М. Бушуев, В.А. Деминский, Л.Ф. Захаров, Ю. Д. Козляев, М. Ф. Колканов. Учебное пособие, для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2009. – 328 с.
2. Костиков В.Г., Парфенов Е.М.,Шахнов В.А. Источники электорпитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.: ил.
3. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.С. Жерненко, А.Ф. Кадацкий и др. Под ред. Ю.Д. Козляева – М.: Радио и связь, 1998. – 328 с.: ил.
4. Китаев В. Е., Бокуняев А. А., М.Ф.Колканов. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов связи. – М.: Радио и связь, 1993. – 232 с.
5. Иванов-Цыганов А. И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991.
6. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / А.А. Бокуняев и др.; Под ред. В.Е. Китаева – М.: Радио и связь, 1988. – 280с.
7. Электропитающие устройства электроакустической и кинотехнической аппаратуры / Векслер Г.С., Пилинский В.В. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 383 с.
8. Бокуняев А.А., Горбачев Б.В., Китаев В.Е. и др. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / Под ред. Китаева В.Е. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
9. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов / О.А. Доморацкий и др.; – М.: Радио и связь, 1981. – 320с.: ил.
10. Электротехнические устройства: Учебник для вузов / О.В. Алексеев, В.Е. Китаев, А.Я. Шихин; Под общ. Ред. А.Я. Шихина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336с.
11. Китаев В.Е. и др.; Электропитание устройств связи. Под ред. В.Е.Китаева. Учебник для вузов. – М.: Связь, 1975. – 328 с.: ил.
12. Китаев В. Е., Бокуняев А. А. и др. Расчет источников электропитания устройств связи ; Под ред. Бокуняева А.А.: Учебное пособие для вузов. – М.: Связь, 1979.
13. Кадацкий А.Ф. Импульсные преобразователи постоянного напряжения. Часть 1. Принципы построения и функционирования. УГАС им. А.С. Попова. – Одеса, 1999.
14. Кадацький А. Ф. Імпульсні перетворювачі постійного струму: Частина 1. Принципи побудови та функціонування. – Одесса: УДАЗ ім. О.С. Попова. Навч. посібник. 2001.
15. Кадацький А.Ф., Андрєєв А.І., Є.П. Бишляга Е.П. Розрахунок перетворювачів напруги з імпульсним регулюванням: Методичний посібник. – Одесса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2002.

16. Кадацький А.Ф., Саксонов О. В. Випрямний пристрій систем електроживлення засобів телекомунікаці: Навч. посібник для самост. роботи студ., практич. занять та дипломн. проектування. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004.
17. Кадацький А. Ф., Саксонов О. В. Імпульсні перетворювачі постійної напруги. Ч. 2. Розрахунок моткових елементів імпульсних перетворю-вачів постійної напруги: Навчальний посібник. ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2005. – 162 с.
18. Андрєєв А.І., Ладигін Л.Є, Бішляга Є.П., Гуцель Е.І. Електроживлення систем зв'язку. Методичний посібник до лабораторних робіт № 1...11. – Одеса, 1999. – 51 с.
19. Андрєєв А.І. Джерела безперебійного живлення телекомунікаційних і комп'ютерних систем: Навч. посібник. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2008.
20. Андреєв А.І., Бишляга Є.П. Розрахунок вихідного випрямляча в джере-лах з безтрансформаторним входом.: Метод. посібник/ – Одеса. УДАЗ ім. О.С.Попова, 1999.
21. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемтохника и расчет. Учебное пособие. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с.
22. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
23. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напря-жения для систем вторичного электропитания. Пер. с англ./ Под ред. Смольникова Л.Е. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
24. Воробьев А.Б. Электроснабжение компьютерных и телекоммуника-ционных систем. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2003. – 280с.
25. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: НГТУ, 2000.– 197 с.
26. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z / Пер. с англ. – К.: «МК-Пресс», СПб.: "КОРОНА ВЕК", 2008. – 256 с.
27. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. Преобразовательная техника. Киев. Изд. объед. Вища школа, 1978. – 424 с.
28. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. – М., Высшая школа, 1974.
29. Казаринов И.А. Проектирование электропитающих установок предприятий проводной связи. – М.: Связь, 1974. – 400 с.
30. Краус Л.А., Гейман Г.В., Лапиров-Скобло М.М., Тихонов В.И. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
31. Основні положення по системах електроживлення вузлів електрозв'язку України/Міністерство зв'язку України. Київ, 1997. – 64 с.
32. Відомчі норми технологічного проектування. Електроустановки підприємств та споруд зв`язку України/ Міністерство зв`язку України. Київ, 1997. – 166 с.
33. Правила технічної експлуатації електроустановок підприємств електрозв'язку.
34. Ведомственные нормы технологического проектирования. Электроустановки предприятий связи и сооружений электросвязи, радиовещания и телевидения. ВСПН332-88 Минсвязи СССР. – М.: Радио и связь, 1989.

Додаткова

35. Букреев С. С. Источники вторичного электропитания / С.С. Букреев, В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович и др. Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983.
36. Букреев С.С. Силовые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1982 – 256 с.
37. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. и др.; Под ред. Найвельта Г.С. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.
38. Моин В.С. Лаптев Н.Н. Стабилизированные транзисторные преобразиватели. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
39. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
40. Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. – М.: Радио и связь, 1989. – 160 с.
41. Александров Ф. И., Сиваков А.Р. Импульсные полупроводниковые преобразователи и стабилизаторы постоянного напряжения. – Л.: Энергия, 1970. – 188 с.
42. Драбович Ю.И., Комаров Н.С., Марченко Н.Б. Транзисторные источники электропитания с бестрансформаторным входом. – Киев: Наукова думка, 1984. – 158 с.
43. Ромаш Э.М. Транзисторные преобразователи в устройствах питания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1975.
44. Хусаинов Ч.П. Высокочастотные импульсные стабилизаторы напряжения. – М.: Энергия, 1980. – 88 с.
45. Сергеев Б.С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1992.
46. Высокочастотные транзисторные преобразователи / Э.М. Ромаш, Ю.И. Драбович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко.– М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
47. Ромаш Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.
48. Источники вторичного электропитания: Справочное пособие / С. С. Букреев, В. А. Головацкий, Г. Н. Гулякович и др.; Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
49. Головацкий В.А. Транзисторные и импульсные усилители и стабилизаторы постоянного напряжения. – М.: Сов. радио, 1974.
50. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
51. Сазонов И.И. Компенсационно-параметрические импульсные стабилизаторы постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – с. 88.
52. Эраносян С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л: Энергоатомиздат, 1991 г.

53. Митрофанов Е.В., Котельников А.К. Высокочастотные выпрямительные устройства с бестрансформаторным входом. Электросвязь, 1991, №7. – С. 10–12.
54. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М: Три Л – Горячая линия – Телеком, 2000 г.
55. Бас А. А. и др. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом / А. А. Бас, В. П. Миловзоров, А. К. Мусолин. – М.: Радио и связь, 1987. – 160 с.: ил.
56. Виленкин А.Г. Импульсные транзисторные стабилизаторы напряжения. – М., 1970.
57. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет / Под ред. Додика С.Д., Гальперина Е.И. – М.: Советское радио, 1969. – 448 с.
58. Руденко В.С., Денисов А.И. Импульсные преобразователи и стабилизаторы на тиристорах. – К.: Техника, 1972.
59. Глебов Б.А. Магнитно-транзисторные преобразователи напряжения для питания РЭА. – М.: Радио и связь, 1981. – 96 с.
60. О.А. Коржавин. Динамические характеристики импульсных полупроводникковых преобразователей и стабилизаторов постоянного напряжения. Учебное пособие для вузов – М.: Радио и связь. – 1997. – 300 с.
61. Семенов Ю.Б. Силовая электроника для любителей и профессионалов. М.: Солон – Р, 2001.
62. Алексанян А.А. и др. Мощные транзисторные устройства повышенной частоты. Л: Энергоатомиздат, 1988.
63. М.Браун. Источники питания. Расчет и конструирование. – К.: МК-Пресс, 2005.
64. Р.Мэк. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. – М.: Додэка-XXI, 2008.
65. К. Сукер. Силовая электроника. Руководство разработчика. Додэка-XXI. – М., 2007.
66. И.М.Готлиб. Источники питания. Инверторы. Конверторы. Линейные и импульсные стабилизаторы. Постмаркет. – М., 2002. – 544 с.
67. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / 2-е изд. – Л: Энергоатомиздат, 1991.
68. Сидоров И. Н., Скорняков С. В. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1994.
69. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М., Советское радио, 1971.
70. Белопольский Н.Н., Каретникова Е.Н., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
71. ГОСТ 22412-77. Трансформаторы силовые на тороидальных сердечниках. Метод расчета.
72. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дроселей малой мощности. Изд. 2. – М. Энергия, 1979. – 399 с.

73. Сидоров И. Н., Биннатов М.Ф., Шведова Л.Г. Индуктивные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1992. – 288 с.
74. Сидоров И.Н., Мукосеев В.В., Христинин А.А. Малогабаритные трансформаторы и дроссели: Справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 416 с.
75. Сидоров И. Н. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники.И. Н. Сидоров, А. А. Христинин и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 384 с.
76. Криштафович И. А. Определение потерь в сердечниках трансформа-торов – Проблемы преобразовательной техники: тр. науч. конф., Киев, 1979, ИЭД АН УССР Ч. 4. – С. 91 – 93.
77. Михайлова М. М., Филиппов В. В., Муслаков В. П. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Под ред. А.Е. Оборонко. – М.: Радио и связь, 1983. – 200 с.
78. Ферриты и ферритовые изделия для источников вторичного электропитания: Справочное пособие: В.И. Хандогин, А.В. Райкова, А.В. Куневич и др.; Под ред. В. И. Хандогина – М., 1990.
79. Аморфные магнитомягкие сплавы и их применение в источниках вторичного электропитания: Справочное пособие. В.И. Хандогин, А.В. Райкова и др. / Под ред. В.И Хандогина – М., 1990.
80. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1991.
81. Бландова Е. С. Расчет трансформаторов статических преобразователей на частоту 5 – 200 кГц. – Электронная техника. Сер. 5: Радиодетали и радиокомпоненты. Вып 4(45). – 1981. – С. 28-33.
82. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М: Энергоатомиздат, 1989.
83. Мкртчан Ж.А. Основы построения устройств электропитания ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
84. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л., Энергия, 1973.
85. Перельман Б.Л. Полупроводниковые приборы. Справочник. – М.: Солон, Микротех. – 1996. – 176 с.
86. Дьяконов М.Н. и др. Справочник по электрическим конденсаторам. Под ред. Четверкова И.И. – М.: Радио и связь, 1983 – 576 с.
87. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

Навчально-методичне видання

Микола Васильович Захарченко
Анатолій Федорович Кадацький
Олександр Петрович Русу
Ігор Павлович Малявін
Віктор Борисович Русаловський
Олександр Анатолійович Грабовий

ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 1 Теоретичні положення
Частина 2 Методичні вказівки

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як посібник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом 6.050903 «Телекомунікації»
(лист № 1/11 – 2644 від 04.04.2011 р.)

Редактор ***І. В. Ращупкіна***