

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

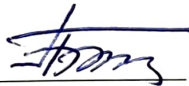
Шифр БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу група ЕТс-20-2


Підпис

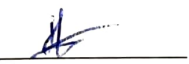
А.О. Челяднік
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

д.т.н., проф. Л.А. Білий
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

С.І. Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

20 06 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

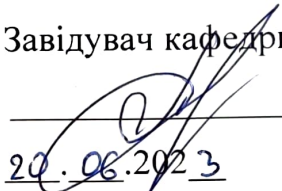
Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС


20.06.2023

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Челяднік Артур Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами

керівник роботи Білий Леонід Адамович, д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 03 2023 р. № 5

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 20.06.23 р.

3. Вихідні дані до роботи характеристики автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами. 3. Розрахунок силової частини. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Інвертори (ДО, А1). 2. Узгоджувальний трансформатор (ВЗ, А1). 3. Автономний резонансний інвертор (ЕЗ, А1). 4. Автономний резонансний інвертор (РР, А1).

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Челяднік Артур Олександрович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 4 арк., сторінок записки 57

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: _____
1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами. 3. Розрахунок силової частини.

Підпис студента 

"26" "06" 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол N1 від "27" "06" 2023 р.

Оцінка проекту ЕК забрав 4,5/В
Рекомендації ЕК у виробництво





Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

"27" "06" 2023 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи.....	7
1.1 Інвертування в силовій електроніці	7
1.2 Автономні резонансні інвертори.....	12
Висновки до першого розділу	20
2 Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами	21
2.1 Вибір схеми АІР і опис принципу дії	21
2.2 Розрахунки для «проміжного» режиму	23
2.3 Розрахунки для «холодного» і «гарячого» режимів.....	28
2.4 Розрахунки режиму стабілізації напруги на навантаженні	32
2.5 Розрахунки режиму стабілізації потужності на навантаженні ...	36
2.6 Вибір елементів.....	39
Висновки до другого розділу.....	41
3 Розрахунок силової частини	42
3.1 Розрахунок дроселя	42
3.2 Розрахунок погоджувального трансформатора.....	45
Висновки до третього розділу	54
Висновки	55
Перелік джерел посилань.....	56

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 23.00.00.000 ПЗ			
Розроб.		Челядник А.О.			Розробка автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір		Білий Л.А.					4	57
Реценз						ХНУ зр. ЕТс-20-2		
Н.Контр		Пундик С.І.						
Затверд		Поліщук О.С.						

ВСТУП

Основна частина радіоелектронної апаратури передбачена на живлення від мережі змінного струму. Але у випадках, якщо стандартна промислова мережа недоступна, виникає необхідність у пристроях, що перетворюють напругу первинного джерела живлення в мережну. У більшості випадків, як відомо, первинні джерела не задовольняють вимогам споживача по частоті і величині вихідної напруги або стабільності його основних параметрів. Найбільше часто відносно низьку постійну напругу первинного джерела необхідно перетворити в змінну синусоїдальну напругу. Інвертори – пристрої, що дозволяють здійснити перетворення постійної напруги в змінну. Так як в інверторах комутуючі прилади (транзистори, тиристори) звичайно працюють у ключовому режимі, природною формою вихідної напруги стала прямокутна. Проте, щоб добитися універсальності інвертора стосовно навантажень змінного струму, він повинен на виході формувати напругу синусоїдальної форми. Останнім часом, існує постійна потреба в перетворювачах нестабілізованої постійної відносно низьковольтної напруги відносно високовольтної синусоїдальної, у зв'язку з широким поширенням альтернативних джерел енергії (вітрогенератори, сонячні батареї). Тому актуальність розробки таких перетворювачів не викликає сумнівів.

Одним з перспективних видів перетворювачів, що реалізують дану функцію, є резонансні інвертори, у яких періодичний характер електромагнітних процесів обумовлений коливальними властивостями LC - контуру на частоті резонансу. Синусоїдальний характер струму забезпечує таким пристроям ряд переваг порівнянню з іншими класами перетворювачів: мінімальні втрати енергії на комутацію силових ключів; висока надійність роботи; малий рівень високочастотних перешкод і перенапруг на елементах; зменшення не симетрії робочих контурів у суміжних півперіодах; можливість застосування в інверторі ключів з

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

неповною керованістю, наприклад, тиристорів і т.д [1]. Крім того, робота в режимі резонансу напруг послідовного коливального контуру дозволяє одержати коефіцієнт підсилення більше 1 без застосування трансформатора. Незважаючи на очевидні переваги резонансних інверторів, у доступній літературі розглянуті тільки їх найпростіші схеми, які не знайшли широкого застосування на практиці в якості формувачів синусоїдальної напруги через сильну залежність величини вихідної напруги від добротності контуру. Тим часом, відомі схемні рішення, що дозволяють досить просто стабілізувати вихідну напругу РІ при впливі на пристрій різних дестабілізуючих факторів.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Інвертування в силовій електроніці

Інвертуванням у силовій електроніці називають процес перетворення постійної напруги в змінну, тобто в деякому значенні процес, зворотний випрямленню. Пристрої, що здійснюють таке перетворення, називаються інверторами. Розрізняють два типи інверторів:

- залежні інвертори, або інвертори, ведені мережею;
- незалежні, або автономні інвертори.

Залежний інвертор працює при наявності в його вихідному колі джерела змінної напруги, який задає форму, частоту і величину напруги створеної ним мережі змінної напруги. У цій мережі можуть перебувати споживачі змінного струму, і завдання залежного (від цієї мережі) інвертора зводиться до постачання в неї відсутньої або додаткової активної потужності. Із прикладом використання залежного інвертора ми зустрічаємося в системі передачі електричної енергії постійним струмом при зв'язку двох енергосистем змінної напруги. У такому випадку на передавальному кінці лінії випрямляч перетворить змінну напруга в постійну, а на приймальному кінці — залежний інвертор перетворить постійний струм у змінний, додаючи в приймальну енергосистему свою активну енергію. Можлива зміна функцій вентильних перетворювачів на зворотні для обігу потоку активної потужності в лінії постійного струму [2].

Автономні інвертори (AI) — пристрої, які перетворюють постійний струм у змінний з незмінною або регульованою частотою і працюючі на автономну (не пов'язану з мережею змінного струму) навантаження. У цьому головну відмінність автономних інверторів від ведених, також перетворюють постійний струм у змінний, але працюючих на мережу змінного струму.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Навантаженням автономного інвертора може бути одиничний споживач (асинхронний двигун, електротехнічна установка) або розгалужена мережа споживачів (кілька навантажень, що працюють по своєму графікові) [1].

АІ може працювати при відсутності на його виході яких-небудь джерел змінної напруги. При цьому частота вихідної напруги автономного інвертора визначається частотою імпульсів керування вентилями інвертора, а форма і величина вихідної напруги — характером, величиною навантаження і його схемою [3].

Розрізняють три типи автономних інверторів:

- автономний інвертор напруги (АІН);
- автономний інвертор струму (АІС);
- автономний резонансний інвертор (АІР).

Основою АІ є вентиляний перемикаючий пристрій, який може виконуватися по однофазних і трифазних схемах (схемам з нульовим виводом або мостовим схемам). У якості ключів, в АІ використовуються транзистори і тиристори. При використанні одноопераційних тиристорів (ООТ), схему доповнюють елементами, призначеними для їхньої комутації. Одним з головних елементів є конденсатор. Важливо відзначити, що призначення конденсаторів не обмежується лише запиранням тиристорів. Конденсатори також застосовуються для формування кривої вихідної напруги інвертора, для визначення характеру перехідних процесів у колі змінного струму і для підвищення напруги на навантаженні.

Основні області застосування автономних інверторів [2]:

- живлення споживачів змінного струму (АІН, АІС) у пристроях, у яких одним із джерел енергії є акумуляторна батарея (бортові вторинні джерела живлення, резервні побутові джерела живлення та ін.), а також резервне живлення відповідальних споживачів при можливому відключенні мережі змінного струму;

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

- електротранспорт (АІН, АІС), що живиться від контактної мережі або якого-небудь джерела постійного струму, у якого як тягових електродвигунів бажано мати прості, надійні і дешеві короткозамкнені асинхронні двигуни;
- електропривод з асинхронними і синхронними двигунами (АІН, АІС), у якого схема АІ служить джерелом регульованих напруги і частоти;
- перетворювачі постійної напруги (АІН, АІС, АІР);
- пристрої для одержання змінного струму (АІН, АІС, АІР) необхідної частоти від джерел прямого перетворення енергії (термо- і фотоелектричні генератори, паливні елементи, тгд-генератори), що виробляють енергію на постійному струмі;
- електротермія (АІС, АІР) для одержання змінного струму підвищеної частоти (плавка металу, нагрів і загартування виробів).

Класифікація АІ проводиться по різних ознаках, серед яких можна виділити наступні [3]:

- по виду схем включення керованих приладів (напівбруківки, бруківки, із середньою крапкою трансформатора і ін.);
- за принципом комутації (вимикання) керованих приладів (індивідуальна, пофазна, групова, загальна; природня і примусова; паралельна, послідовна, послідовно-паралельна; при нульовому значенні струму і напруги та ін.);
- за принципом керування ключами — з незалежним або із самозбудженням;
- по типу використовуваних приладів з напівкерованими приладами (ООТ); з повністю керованими приладами (двоопераційний тиристор (ДОТ), IGBT, MOSFET і ін.);
- по характеру електромагнітних процесів, що протікають у них, — автономні інвертори струму; автономні інвертори напруги, автономні резонансні інвертори;

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- по виду перехідного процесу в колі навантаження (кола змінного струму) — аперіодичні і коливальні.

Умови роботи вентилів у схемах АІС і АІН такі, що вони зазнають підвищеному динамічному впливу струмів і напруг у процесі комутації — di/dt виконані на ООТ, критичних до di/dt і du/dt . Тому АІН, і du/dt , не знайшли широкого застосування в електротехнічних установках. По цій же причині АІС застосовуються в обмеженому частотному діапазоні, в основному 250–2400 Гц. Однак із застосуванням IGBT- і MOSFET-транзисторів, область застосування АІС і АІН в електротехнології значно розширюється і охоплює частотний діапазон 0,01– 1 МГц із потужностями в одиниці обладнання до 1 МВт [2].

Відмінною рисою АІР є те, що комутація вентилів у них відбувається при природньому підході струму до нуля, і щодо низьких динамічних впливах струмів і напруг (низьких di/dt і du/dt), і підвищеному часі відновлення. Тому АІР, виконані на ООТ, дозволяють генерувати струми частотою 2,4-25 кГц і є основою для побудови джерел живлення для багатьох електротехнічних процесів [3].

Залежно від типу системи електроживлення середньої частоти (СЕЖСЧ) [3] вимоги до АІ можуть суттєво різнитися і значно впливати на вибір схемного рішення, принципів керування і захисту, способів регулювання режимів роботи.

Загальні вимоги до АІ як функціональному елементу системи електроживлення можна звести до наступних:

- високий ККД у різних режимах;
- мінімальні розміри;
- по можливості мінімальна маса і вартість;
- максимальна надійність;
- простота обслуговування;
- мінімальний вплив на мережу живлення.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Для АІ, використовуваних в індивідуальних СЕЖСЧ, можна сформулювати окремі вимоги [2]:

- можливість роботи на навантаження із широким діапазоном зміни еквівалентних параметрів (від короткого замикання до холостого ходу) як при повільній, так і при швидкій їхній зміні;
- широкий діапазон регулювання вихідних параметрів;
- надійний захист обладнання в аварійних ситуаціях.

У системах централізованого живлення, АІ включені на загальні вихідні шини, на яких підтримується стабільна напруга і частота, тому вимоги до них специфічні:

- можливість незалежного регулювання струмового навантаження;
- плавне запровадження в дію і вивід у резерв;
- відсутність взаємовпливу паралельно працюючих інверторних блоків;
- відключення інверторного блоку в аварійній ситуації без порушення роботи всієї централізованої СЕЖСЧ.

Системи групового живлення індукційних установок поєднують у собі властивості індивідуальних і централізованих систем. Тому й вимоги до АІ можуть бути представлені як їх сукупність для перших двох систем, але відмітною вимогою є те, що керування, регулювання і захист АІ в такій системі повинні здійснюватися при повній напрузі на шинах постійного струму. У зв'язку з тим, що для ряду технологій потрібна обробка методом двох частот (загартування складних поверхонь деталей, плавка металу в ІТП), АІ повинні мати можливість формування двочастотного вихідного струму. У групових СЕЖСЧ можуть бути використані АІ різних типів залежно від вимог технологічного навантаження, але при загальному живленні по шинах постійного струму повинен бути виключений взаємний вплив одночасний працюючих АІ як у номінальних режимах, так і при розвитку аномальних процесів. При потужностях приблизно до 500 кВт

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливо пряме підключення перетворювача частоти до мережі живлення 0,4 кВ. Для більших потужностей рекомендується підключення через трансформатор до мережі напруги 6 або 10 кВ. Щоб зменшити вплив на мережу живлення, іноді застосовують дванадцятифазні випрямлячі. При підключенні декількох трансформаторів до однієї мережі, групи з'єднання їх обмоток можуть бути обрані таким чином, щоб вийшла дванадцятифазна схема [3].

1.2 Автономні резонансні інвертори

1.2.1 Класифікація АІР

Резонансними називаються автономні інвертори (АІР), у яких періодичний характер електромагнітних процесів у навантаженні обумовлений коливальними властивостями RLC -контур. При цьому в схемі розвивається коливальний процес із частотою кратною або близької до частоти переключення керованих приладів, при цьому струм і напруга навантаження мають майже синусоїдальну форму [2].

АІР призначені для перетворення постійної напруги в змінну напругу підвищеної частоти (від 500-1000 Гц до 5-10 кГц і вище). Однією з основних областей застосування таких перетворювачів є електротермія (індукційна плавка металу, індукційне нагрівання і загартування виробів).

АІР звичайно виконують однофазними, переважно за мостовою схемою. Можливо три варіанти побудови LC -контур і навантаження [3]:

- послідовне вмикання навантаження в послідовний LC - контур — послідовні резонансні інвертори;
- паралельне підключення навантаження LC -контур до L або C ;
- паралельне підключення навантаження LC -контур до частини C .

Ці три види підключення навантаження визначають три види резонансних інверторів:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- послідовний;
- паралельний;
- послідовно-паралельний.

Крім того, розрізняють резонансні інвертори із закритим входом, у яких додаткова індуктивність резонансного контуру перебуває в колі постійного струму (на вході), і з відкритим входом, у яких ця індуктивність є на боці змінного струму (у вихідному колі) [4].

Класифікація АІР за принципом енергообміну із джерелом живлення [3] наступна:

- АІР із прямою передачею енергії від джерела до навантаження, або резонансні дисипативні інвертори (РДІ);
- АІР із двостороннім обміном енергії, у яких, поряд із прямою передачею енергії, відбувається повернення (рекуперація) енергії в джерело живлення, яка накопичена в реактивних елементах схеми (РРІ — резонансні рекуперативні інвертори).

1.2.2 АІР без діодів зустрічного струму

АІР з однобічною передачею енергії по схемах і принципу дії такі ж, як і АІС. Відмінності їх у тому, що параметри схемних елементів підібрані так, що визначають коливальний процес із такою частотою власних коливань, при якій струм через вентиля стає рівним нулю наприкінці або перед кінцем півперіоду — режими РЕКТ і РПТ послідовного АІТ. Їхні схеми також можна підрозділити на мостові, напівмостові, нульові, несиметричні, одноключові. За принципом виконання кола змінного струму — на паралельні, послідовні, послідовно-паралельні і паралельно-послідовні [4].

На практиці в АІР частіше використовують послідовне або послідовно-паралельне включення конденсаторів. Резонансний режим роботи інвертора забезпечує більш легкі умови комутації вентилів при синусоїдальному струмі

з низькими швидкостями наростання і спаду струму до нуля, а також збільшений час відновлення.

1.2.3 Паралельний АІР без діодів зустрічного струму

Паралельні АІР виконують за схемою, у якій індуктивність і конденсатор розраховують так, щоб, при відмиканні пари навхрест лежачих тиристорів, процес перезаряду конденсатора мав коливальний характер і закінчувався протягом півперіоду [2]. У результаті цього струм інвертора i_i має форму двополярних імпульсів у вигляді півхвиль синусоїди, а вхідний струм i_d виходить переривчастим. Якщо паузи між закінченням протікання струму через одну пару тиристорів і моментом відмикання тиристорів наступної пари малі або дорівнюють нулю, то напруга на навантаженні близько до синусоїди [4].

1.2.4 Послідовний АІР без діодів зустрічного струму [2]

На рис. 1.1 приведена схема АІР, яка складається з інверторного мосту на тиристорах VS_1 - VS_4 і послідовно включених у його діагоналі конденсатора C , навантаження Z_H і додаткового дроселя L .

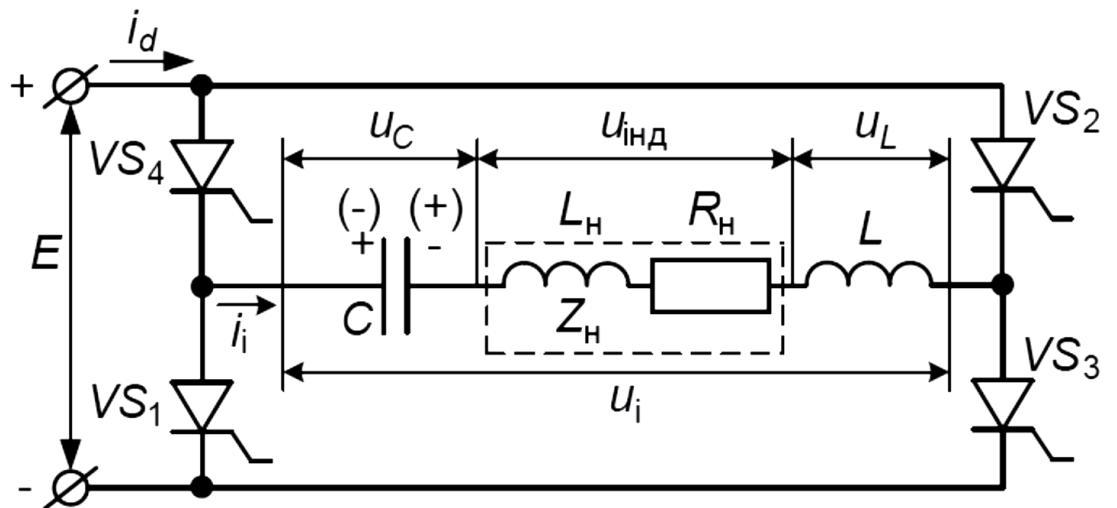


Рисунок 1.1 - Схема послідовного АІР без діодів зустрічного струму

Крива струму вихідному кола інвертора $i_i(t)$ (струму навантаження i_n) формується шляхом попарного відмикання навхрест розташованих тиристорів інверторного мосту (рис. 1.2, а, в). Характер залежності $i_i(t)$ зумовлюється коливальним процесом перезаряду конденсатора C з частотою послідовного коливального контуру, створеного реактивними елементами вихідного кола, при його підключенні провідними тиристорами до джерела живлення E [5].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_n)C}} \quad (1.1)$$

У розглянутій схемі частота власних коливань контуру f_0 пов'язана із частотою проходження імпульсів, що відмикають, на тиристори інверторного мосту (тобто з вихідною частотою f інвертора) співвідношенням $f_0 > f$. У такий спосіб коливальні процеси перезаряду конденсатора (із близьким до синусоїдального законом зміни струму $i_n = i_i$) закінчуються до відмикання чергової пари тиристорів інвертора (рис. 1.2, а, в, г), а в кривих струму навантаження і джерела живлення створюються паузи. Струмова пауза необхідна для проведення операції запирання, що проводила пари тиристорів перед відмиканням чергової пари. По закінченню перезаряду (наприклад, до моменту часу t_1) напруга на конденсаторі $U_{Cm} > E$, у зв'язку з чим до тиристорів, що проводили (у цьому випадку тиристорам VS_3, VS_4) прикладається замикаюча зворотна напруга $(U_{Cm} - E)/2$ (рис. 1.2, е). Тривалість перезарядних процесів конденсаторів, рівна половині періоду власних коливань контуру, визначає тривалість відкритого стану тиристорів і двополярних імпульсів кривої напруги інвертора u_i (рис. 1.2, б) [4].

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

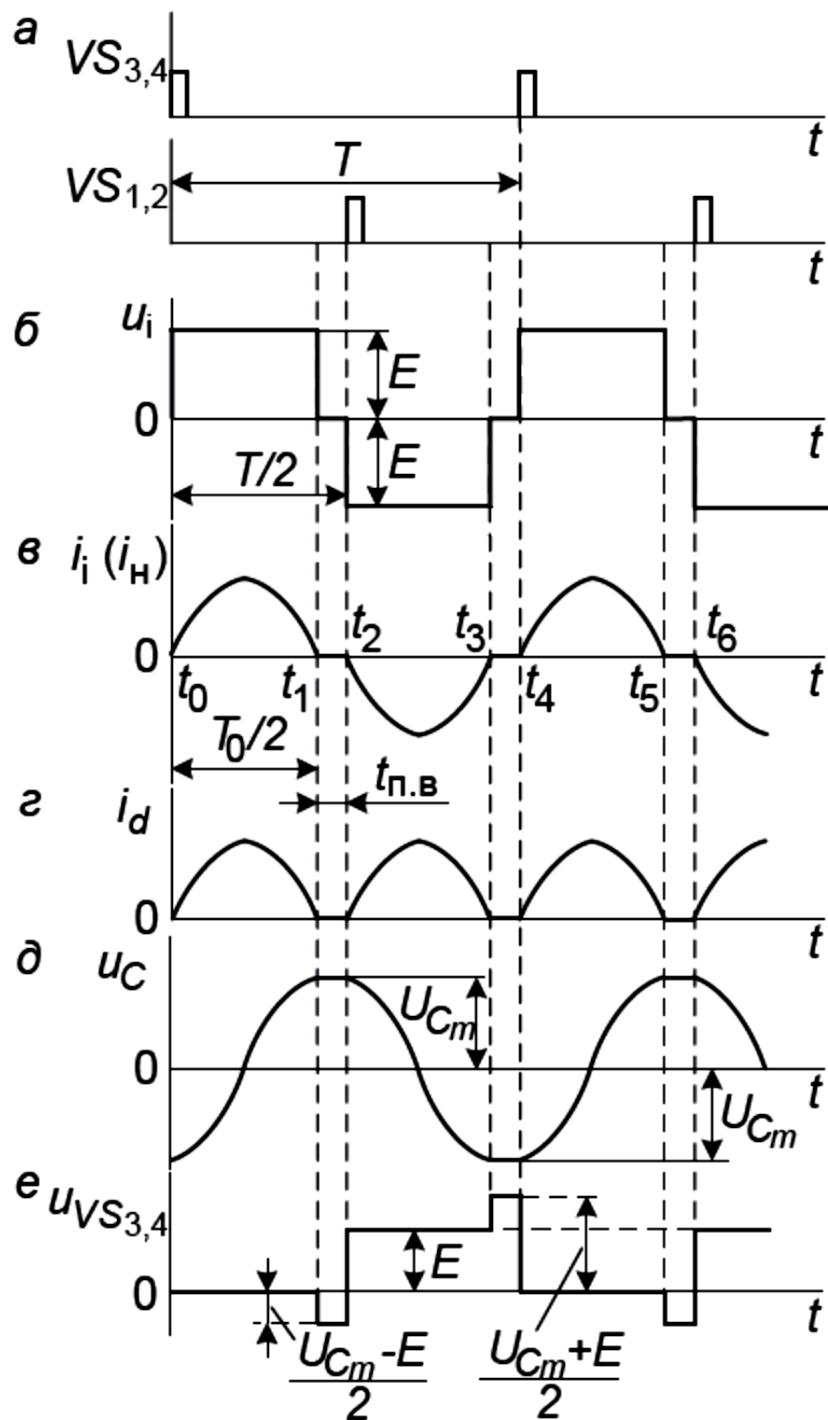


Рисунок 1.2 - Часові діаграми, що ілюструють електромагнітні процеси в схемі послідовного АІР без діодів зустрічного струму

Наявність у кривій струму навантаження паузи характеризує роботу АІР із природнім режимом запирання тиристорів. Необхідна при цьому відмінність у частотах f_0 і f підпорядковується умові підтримки на

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

тиристорах, що проводили, необхідної тривалості зворотної напруги з метою їх запирання

$$t_{n.в} = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2f_0} \geq k_{зан} t_в, \quad (1.2)$$

де $t_{n.в}$ - час, наданий тиристорю для відновлення замикаючих властивостей;

$k_{зан}$ - коефіцієнт запасу, $k_{зан} = 1,2 \dots 1,5$;

$t_в$ - час вимикання тиристора.

1.2.5 Зовнішні характеристики АІР [2]

При незмінній напрузі живлення E , вихідна напруга АІР залежить тільки від значення $\cos\varphi_n$. Зменшення $\cos\varphi_n$ викликає збільшення вихідної напруги інвертора (рис. 1.3).

Спадаючий характер реальних вихідних характеристик при фіксованих значеннях $\cos\varphi_n$ пояснюється залежністю $E = f(I_d)$ джерела живлення (його зовнішньою характеристикою), а також спаданнями напруги на вентилях і активному опорі дроселя.

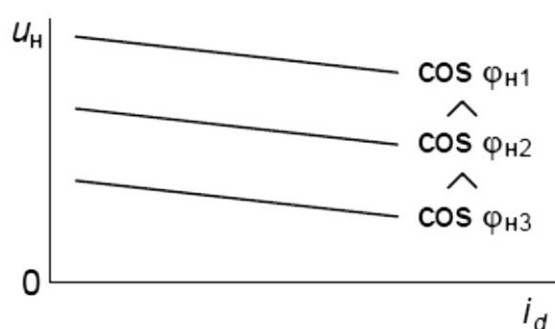


Рисунок 1.3 - Зовнішні характеристики АІР

Важливою особливістю АІР (у порівнянні з АІС і АІН) є його працездатність у режимі короткого замикання навантаження. Векторна

діаграма АІР у режимі короткого замикання приведена на рис. 1.4, де $U_L = U_C = I_i \omega L = I_i (1 / \omega C)$. Струм інвертора $I_i = U_n / R_n$ при цьому обмежується сумарним активним опором обмотки дроселя L проводів, що підводять, спаданням напруги на вентилях і може виявитися надмірно більшим.

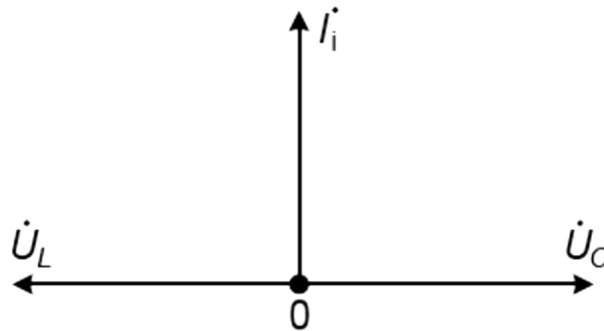


Рисунок 1.4 - Векторна діаграма АІР у режимі короткого замикання

При відключенні навантаження (режим холостого ходу) робота інвертора неможлива, оскільки в такому випадку припиняється формування кривої вихідної напруги (струму). Для забезпечення працездатності інвертора, при відключенні навантаження до його виходу іноді підключається баластовий резистор з невеликим споживанням потужності [5].

1.2.6 Компенсація реактивної потужності навантаження [2]

У деяких випадках застосування АІР, навантаження має велику індуктивність L_n (наприклад, індуктор електротермічної установки). Через малий $\cos \varphi_n$ виникають труднощі оптимального використання тиристорів інвертора по струму і напрузі для одержання необхідних потужності та напруги навантаження. Завдання вирішують підключенням паралельно навантаженню конденсатора $C_{нар}$ (рис. 1.5), налаштованого в резонанс із L_n . Крім зазначеного, паралельно включений конденсатор викликає наближення до синусоїди кривої напруги u_n .

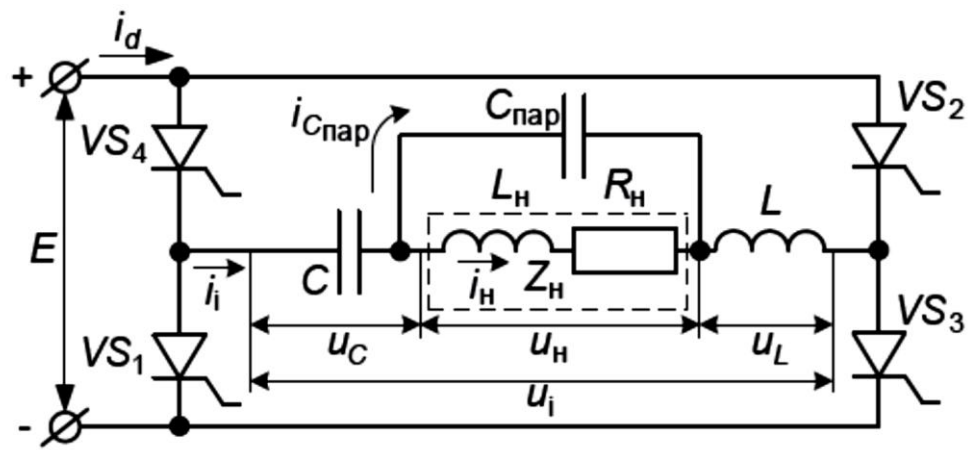


Рисунок 1.5 - Схема АІР з компенсуючим конденсатором, підключаємим паралельно навантаженню

Таким чином, вихідне кола інвертора виявляється складовою із двох резонансних контурів, настроєних на ту саму частоту ($\omega = \omega_0$). Один з коливальних контурів є послідовним ($L - C$), а інший ($L_H - R_H - C_{пар}$) - паралельним. Для паралельного коливального контуру дійсна векторна діаграма, наведена на рис. 1.6.

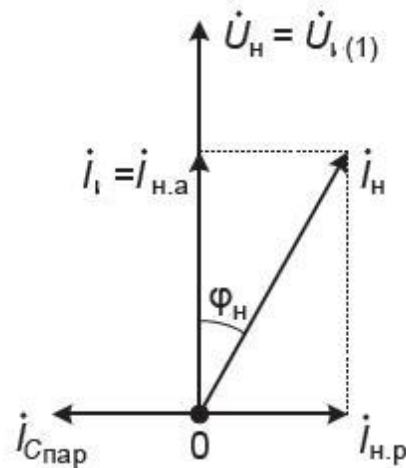


Рисунок 1.6 - Векторна діаграма АІР при компенсації

У послідовному коливальному контурі при резонансі, напруги рівні $u_C = u_L$ і перебувають у протифазі, у зв'язку із чим до паралельного коливального контуру і навантаженню прикладається напруга $u_H = u_{i(1)}$. В

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

паралельному ж коливальному контурі при резонансі спостерігається рівність реактивних складових струмів $I_{Cнар} = I_{н.р}$, у зв'язку із чим струм інвертора буде визначатися активною складовою струму навантаження $I_i = I_{н.а} = I_n \cos\varphi_n$, а струм завантаження

$$I_n = \frac{U_{i(1)}}{\sqrt{(\omega L_n)^2 + R_n^2}}. \quad (1.3)$$

Введення компенсації дозволяє зменшити струм інвертора I_i і відповідно струми тиристорів, а живлення схеми здійснити більш високою напругою, що сприятливо позначається на ККД перетворювача.

У розглянутих схемах АІР, умови для запирання тиристорів, що проводили, створюються на етапах струмових пауз. Зі збільшенням частоти відносна тривалість струмових пауз зростає, і вони займають значну частину періоду кривої струму. З ростом частоти потужність, що віддається в навантаження, зменшується, а форма кривої струму суттєво відрізняється від синусоїди [6].

Висновки до першого розділу

Проведено огляд та аналіз інвертування у силовій електроніці і його основного завдання.

Розглянуто пристрої, що перетворюють постійний струм на змінний з незмінною або регульованою частотою і працюють на автономне навантаження.

Зроблено огляд автономних резонансних інверторів, а також варіанти побудови LC-контурів та навантаження і класифікацію АІР за принципом енергообміну із джерелом живлення.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2 РОЗРОБКА АВТОНОМНОГО РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА ЗІ ЗВОРОТНИМИ ДІОДАМИ

2.1 Вибір схеми АІР і опис принципу дії

У послідовних автономних резонансних інверторах без зворотних діодів умови для запирання провідних тиристорів створюються на етапі струмових пауз у кривій струму навантаження. Зі збільшенням частоти відносна тривалість струмових пауз зростає, і вони займають значну частину періоду. З ростом частоти потужність, що віддається в навантаження, зменшується, а форма кривої струму навантаження значно відрізняється від синусоїди. Для поліпшення показників інвертора при переході в область підвищених частот вихідну схему АІР доповнюють зворотними діодами (рис. 2.1). Застосування зворотних діодів усуває також перевантаження по напрузі на тиристорах, що дозволяє вибирати тиристиори більш низького класу. Недоліком схем зі зворотними діодами є те, що зворотна напруга, що з'являється на тиристорі протягом часу його вимикання, рівна тільки спаданню напруги на діоді, включеному паралельно з ним. Тому в таких схемах необхідні тиристиори з досить малим часом відновлення замикаючих властивостей. В АІР можливі два режими роботи: переривчастого струму навантаження і безперервного струму навантаження. Режиму переривчастого струму відповідає співвідношення частот $\omega_0 > 2\omega$, де $\omega_0 = 2\pi/T_0$ – власна резонансна частота вихідного ланцюга, а $\omega = 2\pi/T$ – вихідна частота інвертора. Режиму безперервного струму відповідає співвідношення власної резонансної частоти і частоти проходження керуючих імпульсів, при якому $\omega_0 < 2\omega$ або $T_0 < T/2$. Завдяки близькій до синусоїди формі кривої струму навантаження, а також кращому використанню тиристорів по струму режим безперервного струму навантаження знаходить більше застосування на практиці [7].

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

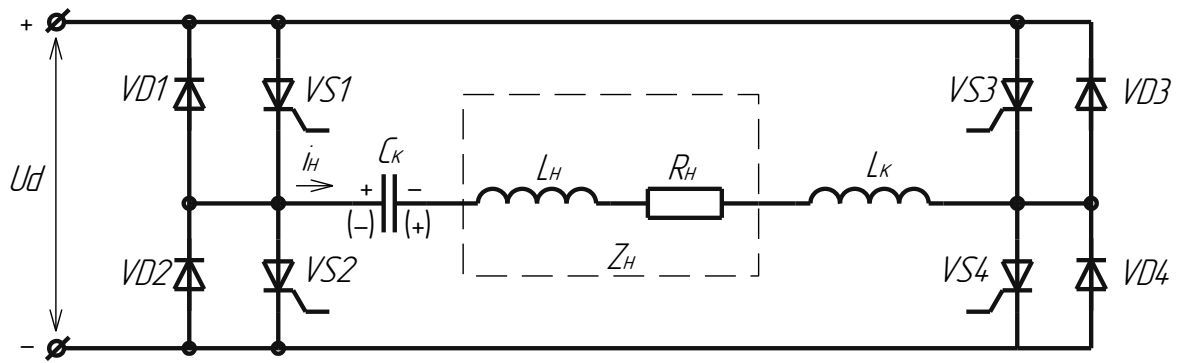


Рисунок 2.1 – Схема послідовного автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами

Розглянемо тимчасові діаграми (рис. 2.2), що характеризують процеси в інверторі в режимі безперервного струму навантаження.

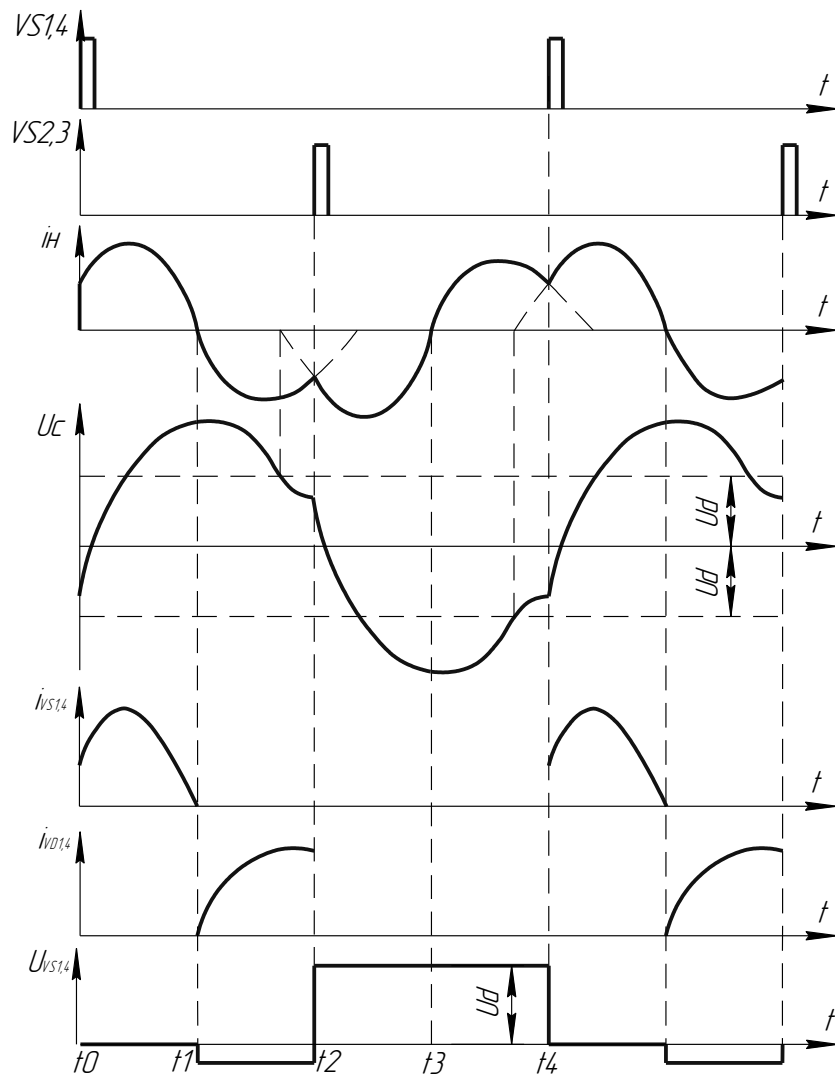


Рисунок 2.2 – Часові діаграми роботи інвертора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У вихідний момент конденсатор C_k мав полярність, зазначену на рисунку 2.1 у дужках. У момент t_0 відмикаються тиристори VS1 і VS4 і конденсатор C_k перезаряджається на протилежну полярність, зазначену на рисунку 2.1 без дужок. У момент t_1 анодний струм тиристорів VS1 і VS4 стає рівним нулю і тиристори замикаються. Тому що в результаті коливального процесу перезаряду конденсатор C_k заряджається до напруги, що перевищує напругу джерела живлення (U_d), то діоди VD1 і VD4 відмикаються і конденсатор C_k розряджається на джерело живлення, забезпечуючи протікання струму навантаження в іншому напрямку. У момент t_2 відмикаються тиристори VS2 і VS3 і струм навантаження комутується на ці тиристори. Конденсатор C_k перезаряджається вихідною полярністю. Після запирання тиристорів VS2 і VS3 струм навантаження протікає через діоди VD2 і VD3. Таким чином, коли струм протікає через тиристори, джерело живлення віддає енергію навантаженню, а на інтервалі провідності діодів частина реактивної енергії вертається в джерело живлення [8].

2.2 Розрахунки для «проміжного» режиму

Вихідні дані:

- номінальна потужність $P_n=30$ кВт;
- вихідна частота $f=3500$ Гц;
- напруга мережі живлення $E=380$ В.

Параметри індукційної установки міняються по ходу нагрівання відповідно до даних таблиці 2.1.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 - Зміна параметрів по ходу нагрівання

Еквівалентні параметри		Режим роботи		
		холодний	проміжний	гарячий
Індуктивність навантаження L_H , Г		$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$
Опір навантаження, Ом	активне, R_H	$35 \cdot 10^{-3}$	$47 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-3}$
	реактивне, $X_{LH} = 2\pi f L_H$	0.11	0.132	0.099
	повне, $z_H = \sqrt{R_H^2 + X_{LH}^2}$	0.115	0.14	0.103
Коефіцієнт потужності $\cos\phi_H = R_H / z_H$		0.303	0.336	0.263

Максимальна випрямлена напруга при живленні від трифазного мостового випрямляча:

$$U_{dm} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_n = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{3.14} \cdot 380 = 513.18 \text{ В} \quad (2.1)$$

Для одержання можливості усунення коливання напруги на вході інвертора в подальших розрахунках використовуємо напругу U_d :

$$U_d = 0.825 \cdot U_{dm} = 0.825 \cdot 513.18 = 423.4 \text{ В} \quad (2.2)$$

Мінімальний кут запирання тиристорів:

$$\delta_1 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1.1 \cdot t_{e.n.}}{T_i} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1.1 \cdot 30}{286} = 0.726 \text{ град}, \quad (2.3)$$

де $t_{в.п.} = 30 \text{ мкс}$ – паспортне значення часу вимикання тиристорів,

$T_i = 1/f = 286 \text{ мкс}$ – період вихідної частоти інвертора.

Власна частота комутуючого контуру:

$$\omega_0 = \omega \cdot \frac{\pi}{\pi - \delta_1} = 21990 \cdot \frac{\pi}{\pi - 0.726} = 28600 \text{ град/с}, \quad (2.4)$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 21990 \text{ град/с}$ – вихідна кругова частота інвертора.

Тривалість протікання анодного струму:

$$\lambda = \pi \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = 3.14 \cdot \frac{21990}{28600} = 2.416 \text{ град} \quad (2.5)$$

Кут включення тиристорів:

$$\psi = \lambda + \delta - \pi = 2.416 + 1.509 - 3.14 = 0.784 \text{ град}, \quad (2.6)$$

де

$$\delta = K_u \cdot \delta_1, \quad (2.7)$$

K_u – коефіцієнт збільшення, прийняли рівним 2.08.

$$\delta = 2.08 \cdot 0.726 = 1.51 \text{ град}$$

Загальна індуктивність схеми:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$L = \frac{-R_{\text{ин}} \cdot \lambda}{2 \cdot \omega \cdot \ln \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot \psi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot \delta\right)} \right]} = \frac{-0.047 \cdot 2.416}{2 \cdot 21990 \cdot \ln \left[\frac{\sin\left(\frac{3.14}{2.416} \cdot 0.784\right)}{\sin\left(\frac{3.14}{2.416} \cdot 1.51\right)} \right]} = 31.64 \text{ мкГн} \quad (2.8)$$

Величина додаткової індуктивності:

$$L_{\text{к}} = L - L_{\text{ин}} = 31.68 - 6 = 25.64 \text{ мкГн} \quad (2.9)$$

Середнє значення вхідного струму:

$$I_d = \frac{P_{\text{н}}}{U_d} = \frac{30000}{423.4} = 70.86 \text{ А} \quad (2.10)$$

Коефіцієнти N і B, що визначають діюче значення струму і напруги навантаження залежно від параметрів інвертора:

$$N = \cos^2 \frac{\pi}{2\lambda} \psi - e^{\frac{-R_{\text{ин}} \cdot \lambda}{2\omega L}} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2\lambda} \delta =$$

$$= \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.416} 0.784 - e^{\frac{-0.047 \cdot 2.416}{2 \cdot 21990 \cdot 31.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.416} 1.509 = 0.125 \quad (2.11)$$

$$B = \lambda - \psi + \frac{\lambda}{2\pi} \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \psi + e^{\frac{-R_{\text{ин}} \cdot \lambda}{\omega L}} \cdot \left(\delta - \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \delta \right) =$$

$$= 2.416 - 0.784 + \frac{2.416}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.416} 0.784 +$$

$$+ e^{\frac{-0.047 \cdot 2.416}{2 \cdot 21990 \cdot 31.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \left(1.509 - \frac{2.416}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.416} 1.509 \right) = 3 \quad (2.12)$$

Діюче значення струму і напруги навантаження:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$I_{н1} = \frac{I_d \cdot \pi^2}{2 \cdot \lambda \cdot N} \cdot \sqrt{\frac{B}{2\pi}} = \frac{70.86 \cdot 3.14^2}{2 \cdot 2.416 \cdot 0.125} \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 3.14}} = 799.35 \text{ A} \quad (2.13)$$

$$U_{н1} = \frac{U_d \cdot 2 \cdot \lambda \cdot N}{\cos \phi_n \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{\frac{B}{2\pi}}} = \frac{423.4 \cdot 2 \cdot 2.416 \cdot 0.125}{0.336 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 3.14}}} = 111.85 \text{ В} \quad (2.14)$$

Струм навантаження, виходячи із заданої потужності:

$$I_{н2} = \sqrt{\frac{P_H}{R_{III}}} = \sqrt{\frac{30000}{0.047}} = 798.94 \text{ A} \quad (2.15)$$

Тому що $I_{н1} \approx I_{н2}$, то використовували погоджувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації $K_T = 1$.

Ємність комутуючого конденсатора:

$$C_K = \frac{1}{L \cdot \omega_0^2 + \frac{R_{III}^2}{4 \cdot L}} = \frac{1}{31.64 \cdot 10^{-6} \cdot 28600^2 + \frac{0.047^2}{4 \cdot 25.64 \cdot 10^{-6}}} = 3.863 \cdot 10^{-5} \text{ Ф} \quad (2.16)$$

Прийняли $C_K = 40 \text{ мкФ}$.

Середні значення анодного струму тиристорів і діодів:

$$I_{ам} = \frac{I_d}{2 \cdot N} \cos^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot \psi = \frac{70.86}{2 \cdot 0.125} \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.416} \cdot 0.784 = 215.8 \text{ A} \quad (2.17)$$

$$I_{а\omega} = \frac{I_d}{2 \cdot N} \cdot e^{-\frac{R_{III} \cdot \lambda}{2 \omega L}} \sin^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot \delta = \frac{70.86}{2 \cdot 0.125} \cdot e^{-\frac{0.047 \cdot 2.416}{2 \cdot 21990 \cdot 31.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.416} \cdot 1.509 = 180.4 \text{ A} \quad (2.18)$$

Максимальна напруга на комутуючому конденсаторі:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$U_{cm} = \frac{\pi(I_{am} + I_{ad})}{\omega \cdot C_K} = \frac{3.14(215.8 + 180.4)}{21990 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 1415 \text{ В} \quad (2.19)$$

2.3 Розрахунки для “холодного” і “гарячого” режимів

Частотний F і навантажувальний D коефіцієнти:

$$F_X = \omega^2 \cdot (L_K + L_{HX}) \cdot C_K = 21990^2 \cdot (25.64 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}) \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0.593 \quad (2.20)$$

$$F_\Gamma = \omega^2 \cdot (L_K + L_{H\Gamma}) \cdot C_K = 21990^2 \cdot (25.64 \cdot 10^{-6} + 4.5 \cdot 10^{-6}) \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0.583 \quad (2.21)$$

$$D_X = \omega \cdot C_K \cdot R_{HX} = 21990 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 0.035 = 0.031 \quad (2.22)$$

$$D_\Gamma = \omega \cdot C_K \cdot R_{H\Gamma} = 21990 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 0.027 = 0.024 \quad (2.23)$$

Тривалість півперіоду протікання анодного струму:

$$\lambda_X = \frac{2\pi F_X}{\sqrt{4F_X - D_X^2}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.593}{\sqrt{4 \cdot 0.593 - 0.031^2}} = 2.419 \text{ рад} \quad (2.24)$$

$$\lambda_\Gamma = \frac{2\pi F_\Gamma}{\sqrt{4F_\Gamma - D_\Gamma^2}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.583}{\sqrt{4 \cdot 0.583 - 0.024^2}} = 2.399 \text{ рад} \quad (2.25)$$

Кути включення тиристорів:

$$\psi_X = \frac{\lambda_X}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{-\sin\left(\frac{\pi^2}{\lambda_X}\right)}{e^{\frac{R_{HX} \cdot \lambda_X}{2 \cdot L_X \cdot \omega}} + \cos\left(\frac{\pi^2}{\lambda_X}\right)} \right) =$$

$$= \frac{2.419}{3.14} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{-\sin\left(\frac{3.14^2}{2.419}\right)}{e^{\frac{0.035 \cdot 2.419}{2 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6} \cdot 21990}} + \cos\left(\frac{3.14^2}{2.419}\right)} \right) = 0.801 \text{ рад}, \quad (2.26)$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

де

$$L_X = L_{HX} + L_K = 5 + 25.64 = 30.64 \text{ мкГн} \quad (2.27)$$

$$\psi_\Gamma = \frac{\lambda_\Gamma}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{-\sin\left(\frac{\pi^2}{\lambda_\Gamma}\right)}{e^{\frac{R_{HG} \cdot \lambda_\Gamma}{2 \cdot L_\Gamma \cdot \omega}} + \cos\left(\frac{\pi^2}{\lambda_\Gamma}\right)} \right) =$$
$$= \frac{2.399}{3.14} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{-\sin\left(\frac{3.14^2}{2.399}\right)}{e^{\frac{0.027 \cdot 2.399}{2 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6} \cdot 21990}} + \cos\left(\frac{3.14^2}{2.399}\right)} \right) = 0.793 \text{ рад}, \quad (2.28)$$

де

$$L_\Gamma = L_{HG} + L_K = 4.5 + 25.64 = 30.14 \text{ мкГн} \quad (2.29)$$

Кути запирання тиристорів:

$$\delta_X = \pi - \lambda_X + \psi_X = 3.14 - 2.419 + 0.801 = 1.523 \text{ рад} \quad (2.30)$$

$$\delta_\Gamma = \pi - \lambda_\Gamma + \psi_\Gamma = 3.14 - 2.399 + 0.793 = 1.536 \text{ рад} \quad (2.31)$$

Резонансні частоти:

$$\omega_{0X} = \frac{\pi}{\lambda_X} \cdot \omega = \frac{3.14}{2.419} \cdot 21990 = 28560 \text{ рад/с} \quad (2.32)$$

$$\omega_{0\Gamma} = \frac{\pi}{\lambda_\Gamma} \cdot \omega = \frac{3.14}{2.399} \cdot 21990 = 28800 \text{ рад/с} \quad (2.33)$$

Коефіцієнти N і B для холодного та гарячого режиму:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$N_X = \cos^2 \frac{\pi}{2\lambda_X} \psi_X - e^{\frac{-R_{HX} \cdot \lambda_X}{2\omega L_X}} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2\lambda_X} \delta_X = \quad (2.34)$$

$$= \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.419} 0.801 - e^{\frac{-0.035 \cdot 2.419}{2 \cdot 21990 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.419} 1.523 = 0.098$$

$$N_\Gamma = \cos^2 \frac{\pi}{2\lambda_\Gamma} \psi_\Gamma - e^{\frac{-R_{H\Gamma} \cdot \lambda_\Gamma}{2\omega L_\Gamma}} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2\lambda_\Gamma} \delta_\Gamma = \quad (2.35)$$

$$= \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.399} 0.793 - e^{\frac{-0.027 \cdot 2.399}{2 \cdot 2199 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.399} 1.536 = 0.075$$

$$B_X = \lambda_X - \psi_X + \frac{\lambda_X}{2\pi} \sin^2 \frac{\pi}{\lambda_X} \psi_X + e^{\frac{-R_{HX} \cdot \lambda_X}{\omega L_X}} \cdot \left(\delta_X - \frac{\lambda_X}{2\pi} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{\lambda_X} \delta_X \right) = 2.419 - 0.801 + \quad (2.36)$$

$$+ \frac{2.419}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.419} 0.801 + e^{\frac{-0.035 \cdot 2.419}{2 \cdot 21990 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \left(1.523 - \frac{2.419}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.419} 1.593 \right) = 3.03$$

$$B_\Gamma = \lambda_\Gamma - \psi_\Gamma + \frac{\lambda_\Gamma}{2\pi} \sin^2 \frac{\pi}{\lambda_\Gamma} \psi_\Gamma + e^{\frac{-R_{H\Gamma} \cdot \lambda_\Gamma}{\omega L_\Gamma}} \cdot \left(\delta_\Gamma - \frac{\lambda_\Gamma}{2\pi} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{\lambda_\Gamma} \delta_\Gamma \right) = 2.399 - 0.793 + \quad (2.37)$$

$$+ \frac{2.399}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.399} 0.793 + e^{\frac{-0.027 \cdot 2.399}{2 \cdot 2199 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6}}} \cdot \left(1.536 - \frac{2.399}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.399} 1.536 \right) = 3.054$$

Напряга на первинній обмотці трансформатора:

$$U_{1X} = \frac{U_d \cdot 2 \cdot \lambda_X \cdot N_X}{\cos \phi_{HX} \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{\frac{B_X}{2\pi}}} = \frac{423.4 \cdot 2 \cdot 2.419 \cdot 0.098}{0.303 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{\frac{3.03}{2 \cdot 3.14}}} = 96.2 \text{ В} \quad (2.38)$$

$$U_{1\Gamma} = \frac{U_d \cdot 2 \cdot \lambda_\Gamma \cdot N_\Gamma}{\cos \phi_{H\Gamma} \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{\frac{B_\Gamma}{2\pi}}} = \frac{423.4 \cdot 2 \cdot 2.399 \cdot 0.075}{0.263 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{\frac{3.054}{2 \cdot 3.14}}} = 83.9 \text{ В} \quad (2.39)$$

Активна потужність у навантаженні:

$$P_{HX} = \frac{U_{1X}^2 \cdot \cos^2 \phi_{HX}}{R_{HX}} = \frac{96.2^2 \cdot 0.303^2}{0.035} = 24330 \text{ Вт} \quad (2.40)$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{HG} = \frac{U_{1Г}^2 \cdot \cos^2 \phi_{HG}}{R_{HG}} = \frac{83.9^2 \cdot 0.263^2}{0.027} = 18070 \text{ Вт} \quad (2.41)$$

Середнє значення вхідного струму:

$$I_{dX} = \frac{P_{HX}}{U_d} = \frac{24330}{423.4} = 57.5 \text{ А} \quad (2.42)$$

$$I_{dГ} = \frac{P_{HG}}{U_d} = \frac{18070}{423.4} = 42.7 \text{ А} \quad (2.43)$$

Середні значення анодного струму тиристорів і діодів:

$$I_{amx} = \frac{I_{dX}}{2 \cdot N_X} \cos^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda_X} \cdot \psi_X = \frac{57.5}{2 \cdot 0.098} \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.419} 0.801 = 221.65 \text{ А} \quad (2.44)$$

$$I_{am\sigma} = \frac{I_{dГ}}{2 \cdot N_{Г}} \cos^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda_{Г}} \cdot \psi_{Г} = \frac{42.7}{2 \cdot 0.075} \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.399} 0.793 = 214.98 \text{ А} \quad (2.45)$$

$$I_{a\sigma x} = \frac{I_{dX}}{2 \cdot N_X} \cdot e^{\frac{-R_{HX} \cdot \lambda_X}{2\omega L_X}} \sin^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda_X} \cdot \delta_X =$$

$$= \frac{57.5}{2 \cdot 0.098} \cdot e^{\frac{-0.035 \cdot 2.419}{2 \cdot 21990 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.419} 1.593 = 192.92 \text{ А} \quad (2.46)$$

$$I_{a\sigma\sigma} = \frac{I_{dГ}}{2 \cdot N_{Г}} \cdot e^{\frac{-R_{HG} \cdot \lambda_{Г}}{2\omega L_{Г}}} \sin^2 \frac{\pi}{2 \cdot \lambda_{Г}} \cdot \delta_{Г} =$$

$$= \frac{42.7}{2 \cdot 0.075} \cdot e^{\frac{-0.027 \cdot 2.399}{2 \cdot 2199 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.399} 1.536 = 193.65 \text{ А} \quad (2.47)$$

Діючі значення первинного струму:

$$I_{1X} = \frac{U_{1X} \cdot \cos \phi_{HX}}{R_{HX}} = \frac{96.2 \cdot 0.303}{0.035} = 833.8 \text{ А} \quad (2.48)$$

$$I_{1Г} = \frac{U_{1Г} \cdot \cos \phi_{НГ}}{R_{НГ}} = \frac{83.9 \cdot 0.263}{0.027} = 818 \text{ А} \quad (2.49)$$

Максимальні напруги на конденсаторі:

$$U_{СХ} = \frac{\pi(I_{амх} + I_{адх})}{\omega \cdot C_K} = \frac{3.14(221.65 + 192.92)}{21990 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 1481 \text{ В} \quad (2.50)$$

$$U_{СГ} = \frac{\pi(I_{амг} + I_{адг})}{\omega \cdot C_K} = \frac{3.14(214.98 + 193.65)}{21990 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 1459 \text{ В} \quad (2.51)$$

2.4 Розрахунки режиму стабілізації напруги на навантаженні

Прийняли частоту f рівної 3560 Гц, $U_{нном} = U_{нл} = 111.85 \text{ В}$.

Тривалість протікання анодного струму

$$\lambda_X = \pi \cdot \frac{\omega}{\omega_{0X}} = 3.14 \cdot \frac{22370}{28560} = 2.46 \text{ рад}, \quad (2.52)$$

$$\lambda_{Г} = \pi \cdot \frac{\omega}{\omega_{0Г}} = 3.14 \cdot \frac{22370}{28800} = 2.44 \text{ рад}, \quad (2.53)$$

де: $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.142 \cdot 3560 = 22370 \text{ рад/с}$ – частота, що задається,

$\omega_{0X} = 28560 \text{ рад/с}$ і $\omega_{0Г} = 28800 \text{ рад/с}$ – власні частоти для відповідних

режимів.

Кути включення тиристорів

$$\psi_X = \frac{2.46}{3.14} \cdot \arctg \left(\frac{-\sin\left(\frac{3.14^2}{2.46}\right)}{e^{\frac{0.035 \cdot 2.46}{2 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} + \cos\left(\frac{3.14^2}{2.46}\right)} \right) = 0.837 \text{ рад}$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$\psi_{\Gamma} = \frac{2.44}{3.14} \cdot \arctg \left(\frac{-\sin\left(\frac{3.14^2}{2.44}\right)}{e^{\frac{0.027 \cdot 2.44}{2 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} + \cos\left(\frac{3.14^2}{2.44}\right)} \right) = 0.83 \text{ рад}$$

Кути запирання тиристорів по формулах:

$$\delta_X = 3.14 - 2.46 + 0.837 = 1.518 \text{ рад}$$

$$\delta_{\Gamma} = 3.14 - 2.44 + 0.83 = 1.532 \text{ рад}$$

Коефіцієнти N і B

$$N_X = \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.46} 0.837 - e^{\frac{0.035 \cdot 2.46}{2 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.46} 1.518 = 0.103$$

$$N_{\Gamma} = \cos^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.44} 0.83 - e^{\frac{0.027 \cdot 2.44}{2 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2 \cdot 2.44} 1.532 = 0.078$$

$$B_X = 2.46 - 0.837 + \frac{2.46}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.46} 0.837 + e^{\frac{0.035 \cdot 2.46}{2 \cdot 30.64 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} \cdot \left(1.518 - \frac{2.46}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.46} 1.518 \right) = 3.03$$

$$B_{\Gamma} = 2.44 - 0.83 + \frac{2.44}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.44} 0.83 + e^{\frac{0.027 \cdot 2.44}{2 \cdot 30.14 \cdot 10^{-6} \cdot 22370}} \cdot \left(1.532 - \frac{2.44}{2 \cdot 3.14} \cdot \sin^2 \frac{3.14}{2.44} 1.532 \right) = 3.054$$

Напруги на навантаженні

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$U_{1X} = \frac{423.4 \cdot 2 \cdot 2.46 \cdot 0.103}{0.303 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{\frac{3.03}{2 \cdot 3.14}}} = 102.79 \text{ В}$$

$$U_{1Г} = \frac{423.4 \cdot 2 \cdot 2.44 \cdot 0.078}{0.263 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{\frac{3.054}{2 \cdot 3.14}}} = 89.47 \text{ В}$$

Розрахунок для інших значень частоти f . Результати режиму занесено в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків режиму стабілізації напруги на навантаженні

	ω , рад/с	22370	22750	23120	23500	23880
«Холодний» режим $\omega_0 = 28560$ рад/с $\cos\varphi_{HX}=0.303$	λ_X , рад	2.46	2.502	2.543	2.585	2.626
	ψ_X , рад	0.837	0.872	0.907	0.941	0.973
	δ_X , рад	1.518	1.512	1.505	1.498	1.489
	N_X	0.103	0.108	0.114	0.122	0.13
	B_X	3.03	3.029	3.029	3.028	3.028
	U_{HX} , В	102.791	110.208	118.637	128.297	139.479
«Гарячий» режим $\omega_0 = 28800$ рад/с $\cos\varphi_{HG}=0.263$	λ_G , рад	2.44	2.481	2.522	2.563	2.605
	ψ_G , рад	0.83	0.867	0.903	0.939	0.974
	δ_G , рад	1.532	1.527	1.523	1.517	1.511
	N_G	0.078	0.082	0.087	0.092	0.099
	B_G	3.054	3.053	3.053	3.052	3.052
	U_{HG} , В	89.466	95.705	102.765	110.815	120.82

За отриманими результатами побудували графіки залежностей $U_{HX}(f)$, $U_{HG}(f)$ (рисунок 5.1), $\delta_X(f)$, $\delta_G(f)$ (рис. 2.3).

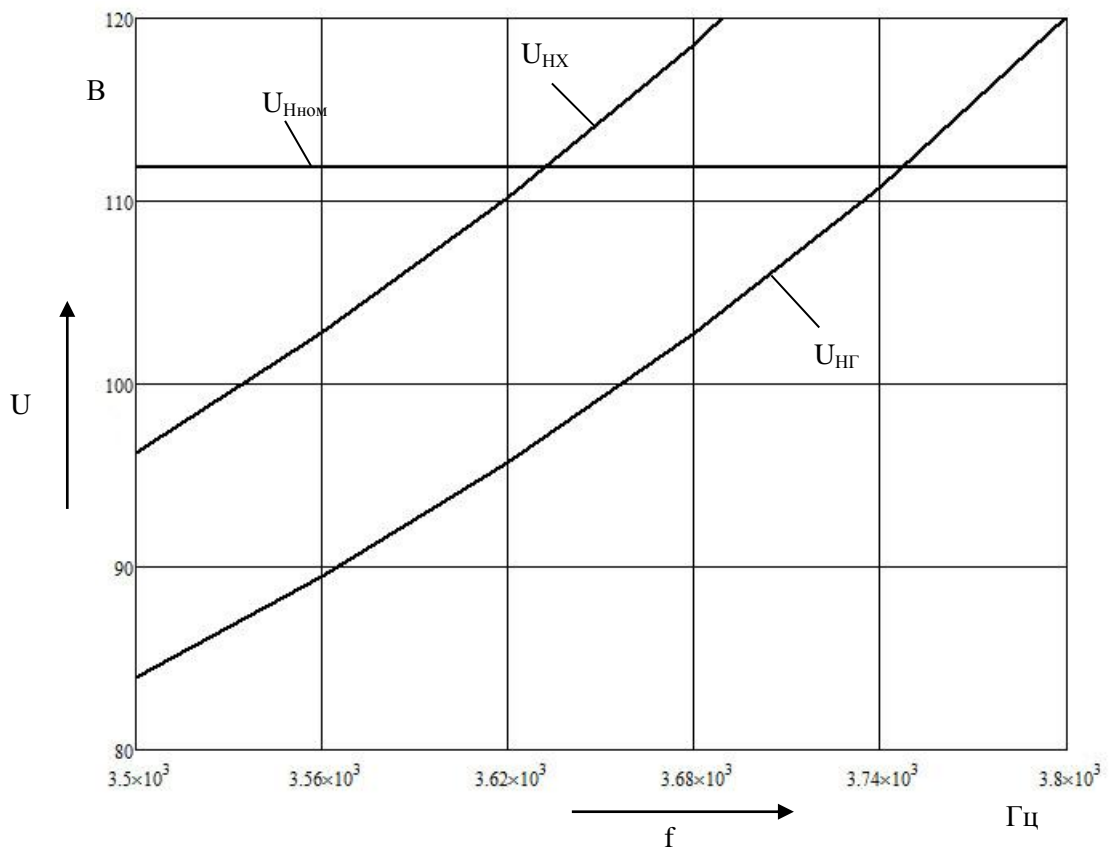


Рисунок 2.3 – Графік залежності напруги на навантаженні від частоти

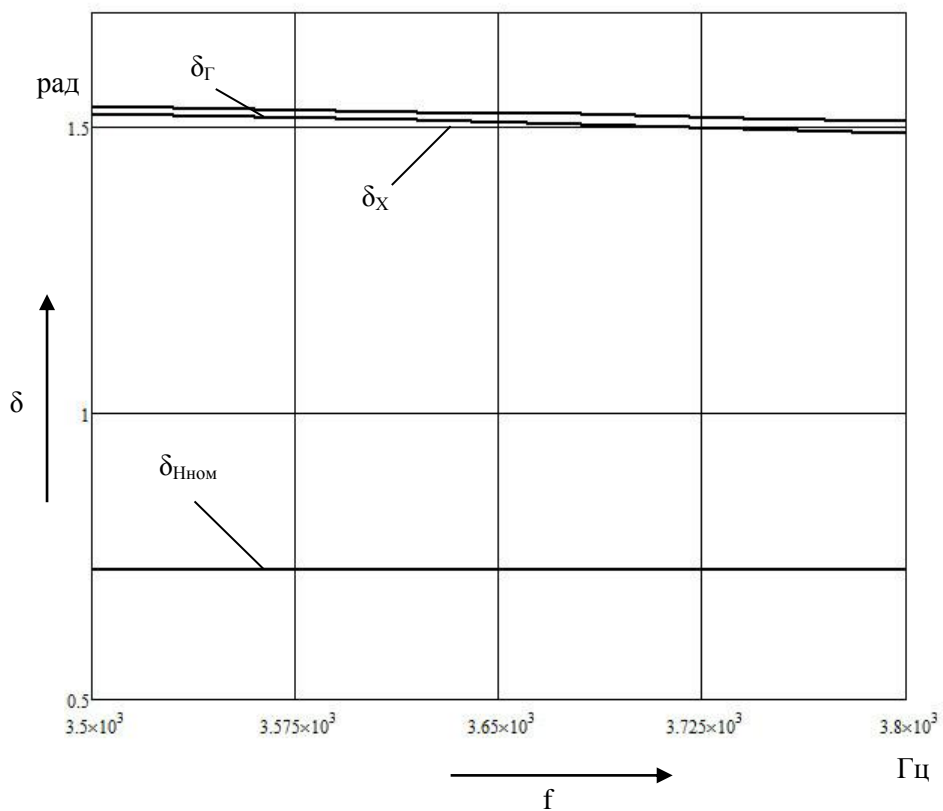


Рисунок 2.4 – Графік залежності кута запирання тиристорів від частоти

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Арк.

35

По даних графіках визначили частоти $f_{x1} = 3632$ Гц і $f_{z1} = 3747$ Гц і відповідні їм кругові частоти

$$\omega_{x1} = 2 \cdot \pi \cdot f_{x1} = 22820 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{z1} = 2 \cdot \pi \cdot f_{z1} = 23540 \text{ рад/с},$$

при яких $U_{HX} = U_{HZ} = U_{Нном}$.

Прийнявши $\omega = \omega_{x1}$ для “холодного” режиму і $\omega = \omega_{z1}$ для “гарячого” режиму провели розрахунки і отримані результати занесли в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Дані розрахунків для частот стабілізації напруги

Параметр	$\omega_{x1} = 22820$ рад/с	$\omega_{z1} = 23540$ рад/с
λ , рад	2.51	2.568
ψ , рад	0.879	0.943
δ , рад	1.511	1.516
N	0.109	0.093
B	3.029	3.052
U_1 , В	111.807	111.829
P_H , Вт	32860	32090
I_d , А	77.619	75.796
$I_{ат}$, А	257.879	286.008
$I_{ад}$, А	219.073	248.11
I_1 , А	968.932	1090
U_{cm} , В	1641	1782

2.5 Розрахунки режиму стабілізації потужності на навантаженні

Прийняли частоту f рівної 3550 Гц, $P_{Нном} = P_H = 30000$ Вт.

Розраховали:

$$\lambda_X = 2.454 \text{ рад}, \quad \psi_X = 0.831 \text{ рад}, \quad \delta_X = 1.519 \text{ рад}, \quad N_X = 0.102, \quad B_X = 3.03, \quad U_{HX} = 101.64 \text{ В};$$

$$\lambda_\Gamma = 2.433 \text{ рад}, \quad \psi_\Gamma = 0.824 \text{ рад}, \quad \delta_\Gamma = 1.532 \text{ рад}, \quad N_\Gamma = 0.078, \quad B_\Gamma = 3.054, \quad U_{H\Gamma} = 88.496 \text{ В}.$$

Активна потужність у навантаженні:

$$P_{HX} = \frac{101.64^2 \cdot 0.303^2}{0.035} = 27150 \text{ Вт}$$

$$P_{H\Gamma} = \frac{88.496^2 \cdot 0.263^2}{0.027} = 20100 \text{ Вт}$$

Аналогічно здійснили розрахунок для інших значень частоти f .
Результати занесено в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків режиму стабілізації потужності

	ω , рад/с	22310	22620	22930	23250	23560
«Холодний» режим $\omega_0 = 28560$ рад/с $\cos\varphi_{HX}=0.303$	λ_X , рад	2.454	2.488	2.523	2.557	2.592
	ψ_X , рад	0.831	0.861	0.89	0.918	0.946
	δ_X , рад	1.519	1.514	1.509	1.503	1.496
	N_X	0.102	0.106	0.111	0.117	0.123
	B_X	3.03	3.029	3.029	3.029	3.028
	U_{HX} , В	101.64	107.633	114.284	121.707	130.046
	P_{HX} , Вт	27150	30450	34330	38940	44450
«Гарячий» режим $\omega_0 = 28800$ рад/с $\cos\varphi_{H\Gamma}=0.263$	λ_Γ , рад	2.433	2.467	2.502	2.536	2.57
	ψ_Γ , рад	0.824	0.855	0.885	0.915	0.945
	δ_Γ , рад	1.532	1.529	1.525	1.521	1.516
	N_Γ	0.078	0.081	0.085	0.089	0.093
	B_Γ	3.054	3.053	3.053	3.052	3.052
	$U_{H\Gamma}$, В	88.496	93.542	99.123	105.328	112.268
	$P_{H\Gamma}$, Вт	20100	22450	25210	28470	32340

За отриманими результатами побудували графіки залежностей $P_{HX}(f)$, $P_{HT}(f)$ (рис. 2.5), $\delta_X(f)$, $\delta_T(f)$ (рис. 2.6).

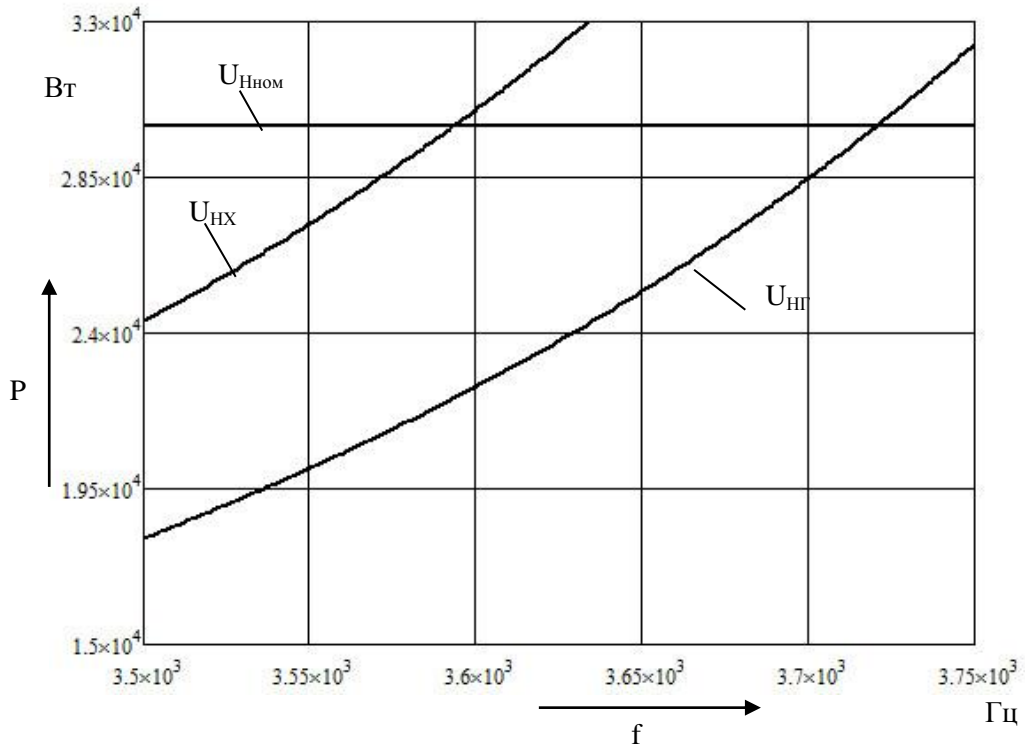


Рисунок 2.5 – Графік залежності потужності на навантаженні від частоти

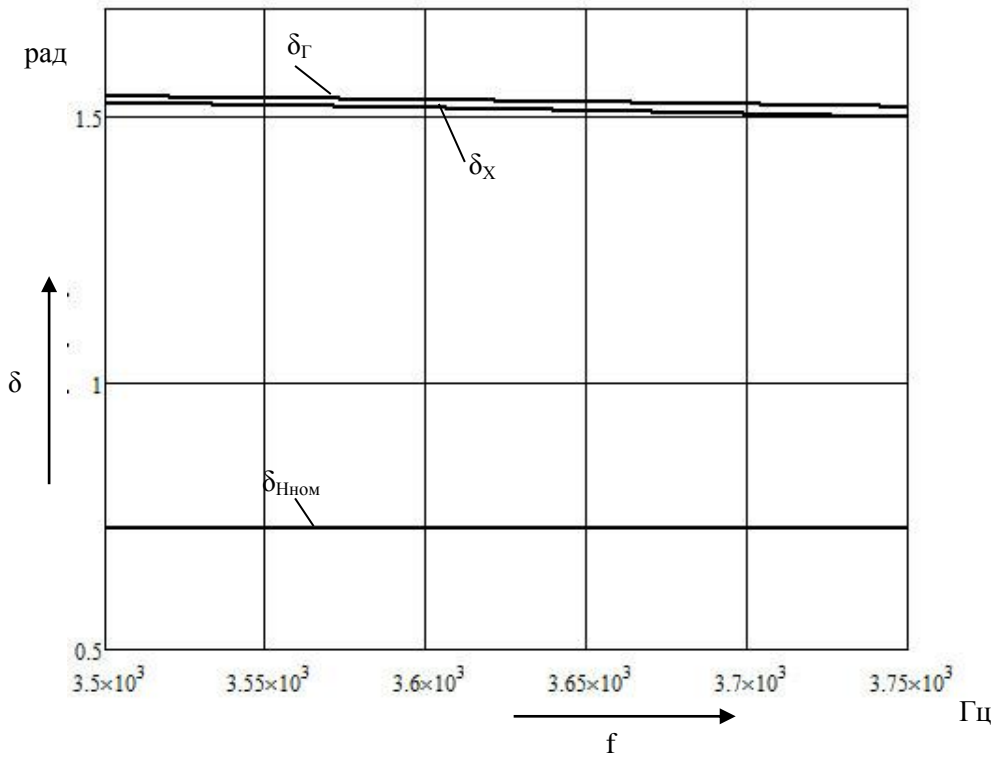


Рисунок 2.6 – Графік залежності кута запирання тиристорів від частоти

По даних графіках визначили частоти $f_{x2} = 3594$ Гц і $f_{z2} = 3721$ Гц і відповідні їм кругові частоти

$$\omega_{x2} = 2 \cdot \pi \cdot f_{x2} = 22580 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{z2} = 2 \cdot \pi \cdot f_{z2} = 23380 \text{ рад/с},$$

при яких $P_{HX} = P_{HG} = P_{Нном}$.

Прийнявши $\omega = \omega_{x2}$ для “холодного” режиму і $\omega = \omega_{z2}$ для “гарячого” режиму провели розрахунки і отримані результати занесли в таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 - Дані розрахунків для частот стабілізації потужності

Параметр	$\omega_{x1} = 22580$ рад/с	$\omega_{z1} = 23380$ рад/с
λ , рад	2.484	2.55
ψ , рад	0.857	0.928
δ , рад	1.515	1.519
N	0.106	0.091
B	3.029	3.052
U_1 , В	106.881	108.146
P_H , Вт	30030	30010
I_d , А	70.924	70.886
$I_{ат}$, А	246.4	276.58
$I_{ад}$, А	210.938	241.137
I_1 , А	926.243	1054
U_{cm} , В	1591	1739

2.6 Вибір елементів

За результатами розрахунків склали табл. 2.6, по якій провели вибір тиристорів і конденсаторів.

Таблиця 2.6 - Вибір тиристорів і конденсаторів

Параметр схеми	Режими						
	Проміжний	Холодний	Гарячий	Холодний $U_{H=CO}$ nst	Гарячий $U_{H=C}$ onst	Холодний $R_{H=CO}$ nst	Гарячий $R_{H=CO}$ nst
I_{at} , А	215.8	221.65	214.98	257.879	286.008	246.4	276.58
$I_{ад}$, А	180.4	192.92	193.65	219.073	248.11	210.938	241.137
U_{cm} , В	1415	1481	1459	1641	1782	1591	1739
t_b , мкс	67	69	70	66	64	67	65

Максимально допустиме напруження на одному конденсаторі рівно 1782 В, тому склали конденсаторну батарею з 2 паралельно з'єднаних конденсаторів типу:

B25834-S2206-K4-2100B-20мкФ (10%).

За найбільшими значенням t_b , I_{at} , $I_{ад}$ у таблиці 2.6 вибрали тиристори ТБ233-320 (параметри зазначено в таблиці 7.2), діоди Д161-320 (параметри зазначено в таблиці 2.7).

Таблиця 2.7 - Параметри тиристора ТБ233-250

Найменування параметра	Значення параметра
Максимально припустимий середній струм у відкритому стані, I_{avm} , А	320
Час вимикання, мкс	32
Час включення, мкс	2
Максимальна швидкість наростання струму, di/dt , А/мкс	1000
Максимальна швидкість наростання напруги, В/мкс	1000
Найбільший зворотний струм, I_{RRM} , мА	40
Заряд зворотного відновлення Q_{rr} , мккл	80
повторювана імпульсна напруга в закритому стані, В	1000
Охолоджувач	ПРО343

Таблиця 2.8 – Параметри діода Д161-250

Гранична зворотна напруга, В	1800
Максимальний припустимий середній струм у відкритому стані, А	320
Найбільший зворотний струм, IRRM, мА	40
Охолоджувач	ПРО371

Для вирівнювання розподілу перехідної напруги застосували шунтувальні Rс-Ланцюги. Для обмеження розрядного струму конденсатора З1 послідовно з ним включили низькоомний резистор R1 опором 20 Ом. Вибрали резистор [3] типу ПЕВ-40-20Ом(5%).

Ємність шунтуючого конденсатора розраховали по наступній формулі

$$C1 = \frac{\Delta Q_{rr} (n-1)}{nU - U_{обц}} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \cdot (2-1)}{2 \cdot 1000 - 1782} = 0.18 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}, \quad (2.54)$$

де ΔQ_{rr} – половина заряду зворотного відновлення, Кл.

Вибрали по довідникові [3] конденсатор типу ДО 5-Н70-1.6кВ-0.01мкФ.

Висновки до другого розділу

Було обрано схеми АІР та описано принцип його дії.

Проведено розрахунки для «проміжного», а також для «холодного» і «гарячого» режимів. Також було проведено розрахунки режиму стабілізації напруги та потужності по навантаженню і обрано елементи схеми.

3 РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Розрахунок дроселя

Величина індуктивності додаткового дроселя 25.64 мкГн. Таку індуктивність можна одержати, використовуючи простий одношаровий соленоїд [12].

Вибрали щільність струму

$$j = 2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Перетин проводу дроселя

$$S_n = \frac{I_{nn}}{j} = \frac{799}{2 \cdot 10^6} \approx 242.74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad (3.1)$$

де I_{nn} – струм навантаження, А.

Щоб забезпечити отриманий перетин проводу, вибрали 5 паралельних проведення з розмірами сторін: $a=5$ мм і $b=10$ мм.

Розміри проводів разом з ізоляцією

$$a' = 2\delta + a = 2 \cdot 0.5 + 5 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (3.2)$$

$$b' = 2\delta + b = 2 \cdot 0.5 + 11.2 \cdot 10^{-3} = 12.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3.3)$$

Розміри перетину еквівалентного проводу

$$a_s = 4a' = 24 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (3.4)$$

$$b_s = 2b' = 24.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3.5)$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Внутрішній діаметр приймаємо рівним $d_2 = 0.27$ м, тоді зовнішній діаметр перебуває як:

$$d_1 = \frac{d_2}{0.905} = \frac{0.27}{0.905} \approx 0.298 \text{ м.} \quad (3.6)$$

Аксіальний розмір поперечного переріза котушки a_k приймаємо рівним внутрішньому діаметру дроселя, тобто $a_k = d_2 = 0.27$ м.

Кількість витків у шарі

$$W_1 = \frac{a_k}{b_s} = \frac{0.27}{0.0244} = 11 \text{ витків;} \quad (3.7)$$

Уточнений аксіальний розмір поперечного переріза котушки

$$a_k = W_1 \cdot b_s = 11 \cdot 0.0244 = 0.268 \text{ м.} \quad (3.8)$$

Радіальний розмір поперечного переріза котушки

$$r = \frac{d_1 - d_2}{2} = \frac{0.298 - 0.27}{2} = 0.0014 \text{ м.} \quad (3.9)$$

Кількість шарів у перетині

$$n_{cl} = \frac{r}{a_s} = \frac{0.0014}{24 \cdot 10^{-3}} = 0.59. \quad (3.10)$$

Для подальшого розрахунків приймаємо $n_{cl} = 1$.

Уточнений радіальний розмір поперечного переріза котушки

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$$r = a_9 n_{ct} = 24 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0.024 \text{ м.} \quad (3.11)$$

Уточнений зовнішній діаметр дроселя

$$d_1 = 2r + d_2 = 2 \cdot 0.024 + 0.27 = 0.318 \text{ м.} \quad (3.12)$$

Середній діаметр котушки дроселя

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{0.318 + 0.27}{2} \approx 0.294 \text{ м.} \quad (3.13)$$

Загальне число витків у котушці

$$W = W_1 \cdot n_{ct} = 11 \cdot 1 = 11 \text{ витків.} \quad (3.14)$$

Допоміжний коефіцієнт

$$\alpha = \frac{a_k}{d} = \frac{0.268}{0.294} = 0.913; \quad (3.15)$$

На підставі допоміжного коефіцієнта з [2] визначили величину магнітного потоку Φ рівної 7.22 Вб.

Індуктивність котушки прямокутного перетину

$$L = 10^{-7} \cdot d \cdot \Phi \cdot W^2 = 10^{-7} \cdot 0.294 \cdot 7.22 \cdot 11^2 = 25.68 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (3.16)$$

Ескіз соленоїда наведено на рисунку 3.1.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

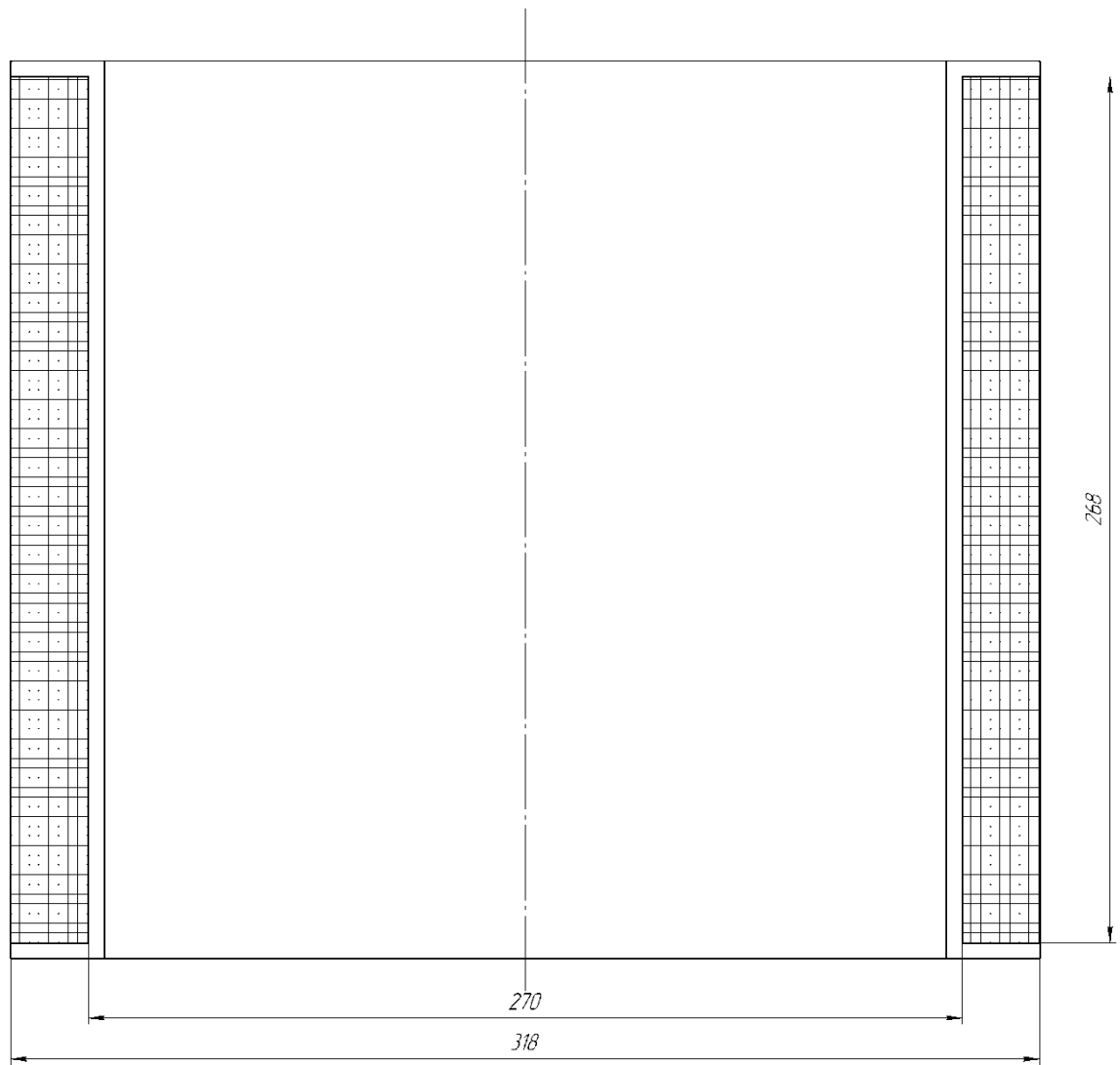


Рисунок 3.1 – Ескіз соленоїда

3.2 Розрахунок погоджувального трансформатора

Трансформатори в автономних інверторах використовуються для узгодження параметрів перетворювача та навантаження і гальванічної розв'язки вентиляційної частини інвертора та навантаження [14].

Вихідні дані для розрахунків:

- діюче значення струму в первинній обмотці трансформатора $I_1 = 799.35 \text{ A}$;
- діюче значення струму навантаження $I_n = 799.35 \text{ A}$;

- діюче значення напруги на первинній обмотці трансформатора:

$$U_1 = 111.847 \text{ В};$$

- коефіцієнт трансформації $K_T = 1$;

- частота напруги $f = 3500 \text{ Гц}$.

Повна потужність трансформатора:

$$S = U_1 \cdot I_1 = 427 \cdot 607 = 89405 \text{ ВА.} \quad (3.17)$$

У якості матеріалу магнітопроводу трансформатора обрана [5] електротехнічна рулонна сталь марки 3405 з товщиною аркуша 0,3 мм.

Характеристики стали [5]:

- питомі втрати $P_{1,7/50} = 1,4 \text{ Вт/кг}$;

- магнітна індукція при напруженості 100 А/м і частоті 50 Гц $B_{50} = 1,61$

Тл;

- коефіцієнт заповнення перетину сталлю $K_3 = 0,96$;

- число пластин на 100 мм товщини пакета магнітопроводу 317.

Діаметр стрижня магнітопроводу D_C , перетин стержня Π_1 , перетин ярма Π_2 , коефіцієнт використання площі круга K_i і число шаблів у перетині магнітопроводу n вибрали по [5]:

$$D_C = 0.14 \text{ м};$$

$$\Pi_1 = 141.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\Pi_2 = 144 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$K_i = 0.92;$$

$$n = 6.$$

Індукція в магнітопроводі при частоті $f = 3000 \text{ Гц}$:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$B_{II} = B_{50} \left(\frac{50}{f} \right)^{0,625} = 1,61 \cdot \left(\frac{50}{3500} \right)^{0,625} = 0.113 \text{ Тл.} \quad (3.18)$$

Геометричні розміри первинної обмотки трансформатора.

Число витків обмотки:

$$\omega_1 = \frac{U_1}{4,44 f B_{II} F_c} = \frac{111.847}{4.44 \cdot 3500 \cdot 0.113 \cdot 0.014} = 4.683, \quad (3.19)$$

де $F_c = K_3 \cdot \Pi_1 = 0.014 \text{ м}^2$ – активний перетин стрижня магнітопроводу.

Прийняли число витків обмотки $\omega_1 = 5$.

Вибрали [5] мідне проведення обмотки марки ПСДК із класом вогнетривкості Н і щільністю струму $j = 2 \text{ А/мм}^2$.

Перетин проводу первинної обмотки:

$$S_1 = \frac{I_1}{j_1} = \frac{799.35}{2 \cdot 10^6} = 399.674 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (3.20)$$

Так як розрахований перетин перевершує максимальний стандартний перетин, то провід розбивається на кілька паралельних проводів. Вибрали по [5] стандартний перетин проводу $S_1' = 49.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Провід розбитий в осьовому напрямку на 2, у радіальному – на 4 паралельних провoda з перетином $49.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ кожний. Розміри проводу: $a_1 = 5,0 \text{ мм}$, $b_1 = 10 \text{ мм}$ без ізоляції; $a_1' = 5.5 \text{ мм}$, $b_1' = 10.5 \text{ мм}$ із ізоляцією.

Тип обмотки – циліндрична одношарова обмотка.

Обмотка намотується пліском.

Осьовий розмір обмотки:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$h_{об1} = 1,02n_{1i}(\omega_{1сл} + 1)b_{1уз} = 1,02 \cdot 2 \cdot (5 + 1) \cdot 10,5 \cdot 10^{-3} = 0.129 \text{ м}, \quad (3.21)$$

де $n_{1i} = 2$ – число паралельних провідників у витку в осьовому напрямку;

$$\omega_{1сл} = \frac{\omega_1}{n_{сл}} = 5 \text{ – число витків в одному шарі обмотки};$$

$$b_{1уз} = b_1' = 10.5 \text{ мм – осьовий розмір ізолюваного провідника.}$$

Радіальний розмір обмотки:

$$a_{об1} = 1,02a_{1уз}n_{сл} + (n_{сл} - 1)\delta_{сл} = 1,02 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 1 + (1 - 1) \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 22.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.22)$$

$$\text{де } a_{1уз} = 4a_1' = 22 \text{ мм – радіальний розмір витка};$$

$$n_{сл} = 1 \text{ – число шарів обмотки.}$$

Геометричні розміри вторинної обмотки трансформатора.

Число витків обмотки:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{K_T} = \frac{5}{1} = 5. \quad (3.23)$$

Вибрали по [5] мідний провід обмотки марки ПСДК із класом вогнетривкості Н і щільністю струму $j_2 = 2.5 \text{ А/мм}^2$.

Перетин проводу вторинної обмотки:

$$S_2 = \frac{I_1 K_T}{j_2} = \frac{799.35 \cdot 1}{2 \cdot 10^6} = 399.674 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (3.24)$$

Так як розрахований перетин перевершує максимальний стандартний перетин, то провід розбивається на кілька паралельних проводів. Вибрали по

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

[5] стандартний перетин проводу $S_2' = 49.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Провід розбитий в осьовому напрямку на 2, у радіальному – на 4 паралельних провода з перетином $49.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ кожний. Розміри проводу: $a_1 = 5,0 \text{ мм}$, $b_1 = 10 \text{ мм}$ без ізоляції; $a_1' = 5.5 \text{ мм}$, $b_1' = 10.5 \text{ мм}$ із ізоляцією.

Розміри пакетів перетину стрижня магнітопроводу на половину перетину стрижня [5]:

Розміри пакетів у поперечному перерізі стержня:

$$f_1 \times C_1 = 0.134 \times 0.021 \text{ м}^2$$

$$f_2 \times C_2 = 0.122 \times 0.014 \text{ м}^2$$

$$f_3 \times C_3 = 0.108 \times 0.01 \text{ м}^2$$

$$f_4 \times C_4 = 0.09 \times 0.0091 \text{ м}^2$$

$$f_5 \times C_5 = 0.069 \times 0.007 \text{ м}^2$$

$$f_6 \times C_6 = 0.042 \times 0.0059 \text{ м}^2$$

висота сегмента:

$$\delta = 0.0032 \text{ м.}$$

Розміри пакетів перетину ярма магнітопроводу на половину перетину ярма. Форма поперечного переріза ярма [5] повторює по розмірах пакетів перетин стержня. Однак для поліпшення пресування ярма ярмовими балками, більш рівномірного розподілу тиску по ширині пакетів і зменшення віяла пластин на кутах пакетів у ярмі поєднуються 2 останніх пакета. Таким чином, ярмо має на 1 щабель менше, чим стержень:

Розміри пакетів у поперечному перерізі ярма:

$$f_1 \times C_1 = 0.134 \times 0.021 \text{ м}^2$$

$$f_2 \times C_2 = 0.122 \times 0.014 \text{ м}^2$$

$$f_3 \times C_3 = 0.108 \times 0.01 \text{ м}^2$$

$$f_4 \times C_4 = 0.09 \times 0.0091 \text{ м}^2$$

$$f_5 \times C_5 = 0.069 \times 0.007 \text{ м}^2$$

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$f_6 \times C_6 = 0.069 \times 0.0059 \text{ м}^2$$

Мінімальна відстань між осями сусідніх стержнів:

$$l_c = D_c + a_{c1} + a_{c2} + a_{об1} + a_{об2} + a_{12} = (0.14 + 0.01 + 0.01 + 22.5 \cdot 10^{-3} + 22.5 \cdot 10^{-3} + 0.01) = 0.215 \text{ м}, \quad (3.25)$$

де a_{c1} і a_{c2} – відстані від стрижня до обмоток ω_1 і ω_2 [5];

$a_{12} = 10$ мм – відстань між обмотками [5].

Висота стержня:

$$h_{c1} = h_{об1} + h'_{я1} + h''_{я1} = 0.129 + 0.015 + 0.015 = 0.159 \text{ м}; \quad (3.26)$$

$$h_{c2} = h_{об2} + h'_{я2} + h''_{я2} = 0.257 + 0.015 + 0.015 = 0.159 \text{ м}, \quad (3.27)$$

де $h'_{я1}$ і $h'_{я2}$ – відстані від обмоток до верхнього і нижнього краю ярма.

Висота стержня прийнята рівної:

$$h_c = h_{c\max} = 0.16 \text{ м}. \quad (3.28)$$

Маса трансформатора.

Маса стержнів:

$$G_c = n F_c h_c \gamma_{cm} = 2 \cdot 0.014 \cdot 0.16 \cdot 7800 = 33.906 \text{ кг}, \quad (3.29)$$

де $n = 2$ – кількість стержнів;

$\gamma_{cm} = 7800$ кг/м³ – питома вага сталі.

Маса ярма:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$G_{\text{я}} = 2F_{\text{я}}l_{\text{я}}\gamma_{\text{ст}} = 2 \cdot 0.014 \cdot 0.075 \cdot 7800 = 16.148 \text{ кг}, \quad (3.30)$$

де $F_{\text{я}} = K_3 \cdot \Pi_2 = 0.014 \text{ м}^2$ – активний перетин ярма;

$l_{\text{я}} = l_c - D_c = 0.075 \text{ м}$ – відстань між сусідніми стрижнями.

Маса кутів магнітопроводу:

$$G_{\text{y}} = 4 \frac{F_c}{2} h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} = 4 \cdot \frac{0.014}{2} \cdot 0.134 \cdot 7800 = 28.303 \text{ кг}, \quad (3.31)$$

де $h_{\text{я}} = 2 \cdot (c_{1\text{я}} + c_{2\text{я}} + c_{3\text{я}} + c_{4\text{я}} + c_{5\text{я}} + c_{6\text{я}}) =$ – висота
 $= 2 \cdot (0.021 + 0.014 + 0.01 + 0.0091 + 0.007 + 0.0059) = 0.134 \text{ м}$

ярма.

Маса магнітопроводу:

$$G_{\text{M}} = G_c + G_{\text{я}} + G_{\text{y}} = 33.906 + 16.148 + 28.303 = 78.357 \text{ кг}. \quad (3.32)$$

Маса обмотки ω_1 .

Внутрішній діаметр первинної обмотки:

$$D_1' = D_c + 2a_{c1} = 0.14 + 2 \cdot 0.01 = 0.16 \text{ м}. \quad (3.33)$$

Зовнішній діаметр первинної обмотки:

$$D_1'' = D_1' + 2a_{об1} = 0.16 + 2 \cdot 22.5 \cdot 10^{-3} = 0.205 \text{ м}. \quad (3.34)$$

Маса металу первинної обмотки:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_1 = \pi \frac{D_1' + D_1''}{2} \omega_1 S_1' \gamma_{np} n_{1i} = 3,14 \cdot \frac{0.16 + 0.205}{2} \cdot 5 \cdot 49.1 \cdot 10^{-6} \cdot 8700 \cdot 8 = 9.793 \text{ кг}, \quad (3.35)$$

де $\gamma_{np} = 8700 \text{ кг/м}^3$ – питома вага міді.

Маса проводу первинної обмотки:

$$G_{об1} = (1 + K_y) G_1 = (1 + 0.03) \cdot 9.793 = 10.083 \text{ кг}, \quad (3.36)$$

де $K_y = 0.03$ – коефіцієнт збільшення маси проводу за рахунок ізоляції [5].

Маса обмотки ω_2 . Розрахунки проводяться аналогічно:

$$G_{об2} = 10.083 \text{ кг}. \quad (3.37)$$

Маса трансформатора:

$$G = G_M + G_{об1} + G_{об2} = 78.357 + 10.083 + 10.083 = 98.531 \text{ кг}. \quad (3.38)$$

Основні втрати в обмотках.

Основні втрати в обмотці ω_1 :

$$P_1' = K_t j_1^2 G_1 \cdot 10^{-12} = 3.034 \cdot (2.035 \cdot 10^6)^2 \cdot 9.793 \cdot 10^{-12} = 123 \text{ Вт}, \quad (3.39)$$

$$\text{де } j_1 = \frac{I_1}{S_1' \cdot n_{1P1}} = \frac{799}{49.1 \cdot 10^{-6} \cdot 8} = 2.035 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \text{ - щільність струму в}$$

обмотці ω_1 ;

$$K_t = 1,97 \cdot (1 + 0,004(t - 20)) = 1.97 \cdot (1 + 0.004(155 - 20)) = 3.034 \quad -$$

коефіцієнт для мідного проводу;

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$t = 155 \text{ }^\circ\text{C}$ – припустима температура нагрівання ізоляції обмотки класу Н.

Основні втрати в обмотці ω_2 :

$$P'_2 = K_t j_2^2 G_2 \cdot 10^{-12} = 3.034 \cdot (2.035 \cdot 10^6)^2 \cdot 9.793 \cdot 10^{-12} = 123 \text{ Вт}, \quad (3.40)$$

де
$$j_2 = \frac{I_1}{S'_2 \cdot n_{\text{ПР}2}} = \frac{799}{49.1 \cdot 10^{-6} \cdot 8} = 2.035 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$
 - щільність струму в

обмотці ω_2 .

Додаткові втрати в обмотках від вихрових струмів основної частоти.

Додаткові втрати в обмотці ω_1 :

$$P_{\delta 1} = K_\delta f^2 a_{\text{нр}1}^2 G_1 B_{\delta 1}^2 = 7.68 \cdot 10^3 \cdot 3500^2 \cdot 0.005^2 \cdot 9.793 \cdot (1.43 \cdot 10^{-5})^2 = 0.019 \text{ Вт}, \quad (3.41)$$

де $K_\delta = 7.68 \cdot 10^3$ – коефіцієнт додаткових втрат [5, табл.11];

$a_{\text{нр}1} = a_1 = 0.005 \text{ м}$ – перпендикулярний полю розсіювання лінійний розмір провідника;

$$B_{\delta 1} = \frac{2}{\sqrt{15}} \cdot B_{m1} = \frac{2}{\sqrt{15}} \cdot 2.77 \cdot 10^{-5} = 1.43 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} - \text{еквівалентна магнітна}$$

індукція поля розсіювання;

$$B_{m1} = \frac{1,78}{h_{\text{об}1}} \omega_1 I_1 10^{-6} = \frac{1.78}{0.257} \cdot 5 \cdot 799 \cdot 10^{-6} = 2.77 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} - \text{амплітуда}$$

осьової складової магнітної індукції розсіювання.

Додаткові втрати в обмотці ω_2 :

$$P_{\delta 2} = 7.68 \cdot 10^3 \cdot 3500^2 \cdot 0.005^2 \cdot 9.793 \cdot (1.43 \cdot 10^{-5})^2 = 0.019 \text{ Вт}. \quad (3.42)$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Втрати холостого ходу в магнітопроводі трансформатора:

$$P_0 = K_x P_{1,7/50} G_M = 1.45 \cdot 1.4 \cdot 78.357 = 160 \text{ Вт}, \quad (3.43)$$

де $K_x = 1.45$ – коефіцієнт, що враховує сумарні додаткові втрати в магнітопроводі трансформатора.

Загальні втрати в трансформаторі:

$$P = P'_1 + P'_2 + P_{\epsilon 1} + P_{\epsilon 2} + P_0 = 123 + 123 + 0.019 + 0.019 + 160 = 406.038 \text{ Вт}. \quad (3.44)$$

ККД трансформатора:

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{S}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{406.308}{89400}\right) \cdot 100\% = 99.5\% . \quad (3.45)$$

Висновки до третього розділу

Спеціально для даної схеми інвертора був розрахований дросель без сердечника з індуктивністю 25.68 мкГн, а, що також погоджувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації рівним 1, потужністю 89400 ВА, з коефіцієнтом корисної дії 99.5% і сукупною масою, без обліку кріпильних елементів, порядку 98.5 кг.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ВИСНОВКИ

В результаті роботи над бакалаврською роботою було проведено огляд та аналіз інвертування у силовій електроніці і його основного завдання.

Розглянуто пристрої, що перетворюють постійний струм на змінний з незмінною або регульованою частотою і працюють на автономне навантаження.

Зроблено огляд автономних резонансних інверторів, а також варіанти побудови LC-контурів та навантаження і класифікацію АІР за принципом енергообміну із джерелом живлення.

Було обрано схеми АІР та описано принцип його дії.

Проведено розрахунки для «проміжного», а також для «холодного» і «гарячого» режимів. Також було проведено розрахунки режиму стабілізації напруги та потужності по навантаженню і обрано елементи схеми.

Спеціально для даної схеми інвертора був розрахований дросель без сердечника з індуктивністю 25.68 мкГн, а, що також погоджувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації рівним 1, потужністю 89400 ВА, з коефіцієнтом корисної дії 99.5% і сукупною масою, без обліку кріпильних елементів, порядку 98.5 кг.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Іваненко О.М., Петренко В.С. "Аналіз резонансних інверторів зі зворотними діодами для автономних електроенергетичних систем" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2017. - № 2 (106). - С. 42-48.

2. Ковальчук М.В., Бобак Є.М. "Особливості роботи автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2015. - № 4 (94). - С. 34-40.

3. Петренко В.С., Іваненко О.М. "Моделювання та аналіз роботи автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Електротехніка і електромеханіка. - 2018. - № 4. - С. 50-56.

4. Білецький А.І., Шевченко В.М. "Визначення основних характеристик автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - 2016. - Вип. 45. - С. 68-73.

5. Кравченко В.В., Петренко В.С. "Вплив параметрів автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами на ефективність роботи" // Енергетика та електротехніка. - 2014. - № 2. - С. 45-51.

6. Іванов А.М., Петренко В.С. "Розробка та дослідження автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Проблеми електротехніки та електромеханіки. - 2019. - № 2. - С. 26-31.

7. Васильченко О.М., Гриценко І.В. "Оптимізація параметрів автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Енергетика та електротехніка. - 2016. - № 4. - С. 61-67.

8. Коваленко В.І., Литвин О.В. "Методи розв'язання задачі автоматизованої настройки автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Вісник Київського національного університету. Серія "Техніка і енергетика". - 2017. - Вип. 22. - С. 45-50.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

9. Горбачук А.М., Шаповал О.В. "Використання резонансного інвертора зі зворотними діодами у системах електроживлення" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2018. - № 3 (99). - С. 62-68.

10. Іванова О.П., Шевченко І.М. "Моделювання та аналіз роботи автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами у MATLAB" // Проблеми електротехніки та електромеханіки. - 2015. - № 3. - С. 49-54.

11. Козаченко С.М., Петренко В.С. "Оптимізація режимів роботи автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2019. - № 2 (114). - С. 23-28.

12. Марченко В.І., Іванов А.М. "Аналіз впливу параметрів автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами на його ефективність" // Енергетика та електротехніка. - 2017. - № 3. - С. 73-79.

13. Гордієнко О.О., Петренко В.С. "Синтез та аналіз автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами для електроенергетичних систем" // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2020. - Вип. 205. - С. 42-48.

14. Лисенко А.В., Петренко В.С. "Моделювання та аналіз параметрів автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами в середовищі Simulink" // Енергетика та електротехніка. - 2018. - № 1. - С. 61-66.

15. Кравченко В.В., Іваненко О.М. "Дослідження впливу діаметра дроселів на ефективність автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Електротехніка і електромеханіка. - 2016. - № 3. - С. 63-68.

16. Петров В.С., Шевченко І.В. "Визначення параметрів автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами на основі методу Нелдера-Міда" // Енергетика та електротехніка. - 2015. - № 4. - С. 78-84.

17. Шаповал А.О., Петренко В.С. "Розробка алгоритму автоматизованої настройки автономного резонансного інвертора зі зворотними діодами" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2020. - № 3 (123). - С. 16-22.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ДОДАТКИ

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		