

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

До захисту допущено  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юлія ЯМНЕНКО  
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2020 р.

## Дипломний проєкт

на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Спеціальність 171 Електроніка  
(код та назва спеціальності)

Освітня програма Електронні компоненти і системи

на тему: Джерело живлення вентиляно-індукторного двигуна

Виконав студент IV курсу, групи ДС-71

\_\_\_\_\_ Антон БОГОМОЛ \_\_\_\_\_  
(ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Керівник доц. каф. ЕПС, к.т.н., доц. Дмитро МИКОЛАЄЦЬ  
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант Технічний розділ  
(назва розділу) (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент Доцент каф ЕІ, к.т.н. Ганна ПОРЄВА  
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант  
з нормоконтролю доц. каф. ЕПС, к.т.н., доц. Лариса БАТРАК  
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань

Студент

(підпис)

Київ – 2021 року



**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка  
(шифр і назва)

Освітня програма Електронні компоненти і системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юлія ЯМНЕНКО  
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" 20 " травня 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Антону БОГОМОЛУ  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту Джерело живлення вентиляно – індукторного двигуна

Керівник проєкту доц. каф.ЕПС Дмитро МИКОЛАЄЦЬ,  
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

затверджені наказом по університету від « 20 » травня 2021 року № 1316-с

2. Термін подання студентом проєкту 07.06.2021 року

3. Вихідні дані до проєкту Електродвигун з вихідною потужністю 4кВт, номінальна напруга 72 В, робоча напруга 48-72В, номінальний струм 65А, струм без навантаження 23А.

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

Огляд параметрів сучасних електродвигунів. Спосіб їх живлення. Розробка комірки джерела живлення на основі резонансного інвертора, для керування фазою двигуна.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Схема електрична структурна; 2. Схема електрична принципова; Теоретичне креслення

---

---

---

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Ім'я ПРІЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строки виконання етапів проєкту	Примітка
<b>1</b>	Огляд літератури	12.04.21-18.04.21	
<b>2</b>	Розробка структурної схеми	19.04.21-05.05.21	
<b>3</b>	Розробка принципової схеми	06.05.21-21.05.21	
<b>4</b>	Розробка силової частини схеми	22.05.21-03.06.21	
<b>5</b>	Розрахунок елементів схеми	22.05.21-06.06.21	
<b>6</b>	Оформлення пояснювальної записки	23.05.21-06.06.21	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Антон БОГОМОЛ

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дмитро МИКОЛАСЦЬ

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Метою дипломного проекту є розробка джерела живлення вентиляльно-індукторного двигуна. Вентильно-індукторний двигун (ВІД) - це відносно новий тип електромеханічного перетворювача енергії, який поєднує в собі властивості і електричної машини, і інтегрованої системи регульованого електроприводу.

В роботі проаналізовані варіанти можливого конструктивного виконання схеми живлення. Розроблена електрична структурна схема та принципова схема системи управління на основі резонансного інвертора. Зроблено розрахунок елементів електричної схеми.

***Ключові слова: вентиляльно-індукторний двигун, резонансний інвертор, випрямляч, діодний міст.***

## ANNOTATION

The purpose of the diploma project is to develop a power supply for the Switched Reluctance Motor. The Switched Reluctance Motor (SRM) is a relatively new type of electromechanical energy converter, which combines the properties of both an electric machine and an integrated system of adjustable electric drive. The variants of possible constructive execution of the power supply scheme are analyzed in the work. The electric structural scheme and the schematic scheme of the control system on the basis of the resonant inverter are developed. The calculation of the elements of the electrical circuit is made.

***Key words: Switched Reluctance Motor, resonant inverter, rectifier, diode bridge.***

# ЗМІСТ

	Ст.
ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА .....	7
1.1 Принцип роботи вентиляно-індукторного двигуна.....	7
1.2 Компоненти джерела живлення ВІД.....	9
1.2.1 Резонансний інвертор .....	9
1.2.2 Автономний резонансний інвертор .....	15
1.2.3 Діодний міст.....	16
1.2.4 Трансформатор напруги .....	20
1.3 Структурна схема джерела живлення .....	23
2 ПОБУДОВА І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ВІД.....	25
2.1 Розробка схеми електричної принципової .....	25
2.2 Розрахунок елементів системи живлення.....	26
3 ПОБУДОВА СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ .....	39
3.1. Побудова системи керування.....	39
3.2. Алгоритм роботи системи керування.....	41
ВИСНОВКИ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	45
Додаток А. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ	
Додаток	SUMMARY

ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ									
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата	Джерело живлення вентиляно-індукторного двигуна	Літ.	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Богомол А.О.						3	43
Перевір.		Миколаєць Д.А.							
Реценз.									
Н. Контр.		Батрак Л.М.							
Затверд.		Миколаєць Д.А.							
						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДС-71 «КПІ ім. Ігоря Сікорського».			

## ВСТУП

На даний час в конструюванні сучасних електродвигунів знижується частина електроприводів постійного струму. Це можна пов'язати з ненадійністю механічного колекторного вузла і більш високою вартістю двигунів постійного струму в порівнянні з двигунами змінного струму. Основний альтернативою колекторним приводам постійного струму є асинхронні електроприводи. У той же час, розвивається теорія і практика електроприводів з вентильними, тобто електронно-комутованими двигунами, наприклад, на основі вентильно-індукторного двигуна (ВІД). В зарубіжній науково-технічній літературі ВІД зустрічається під аббревіатурою SRM (Switched Reluctance Motor). Двигуни цього типу прості у виготовленні, технологічні і дешеві.

Перспективність ВІД проявилася в 80-х роках ХХ століття завдяки бурхливому розвитку технологій електронної промисловості і, в першу чергу, силової електроніки. Великий стрибок в цьому напрямку дозволив промисловості приступити до серійного випуску нової елементної бази, що володіє високими показниками максимальних параметрів і швидкодії. Подальший прогрес в області інформаційних технологій і комп'ютерної техніки, що спостерігається з 90-х років ХХ століття, остаточно визначив місце ВІД в ряду сучасних і перспективних двигунів для систем електроприводу нового покоління, дозволив реалізувати складні алгоритми управління, застосувати для їх створення комп'ютерні системи автоматизованого проектування.

Сучасний ВІД - це електродвигун, що працює спільно з електронним перетворювачем, виконаним за інтегральною технології, і мікропроцесором, що дозволяє здійснити оптимальне управління двигуном з максимальними показниками якості перетворення енергії і датчиком положення ротора.

Однак, як і будь-який пристрій, ВІД має і переваги й недоліки.

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До переваг ВІД слід віднести надійність і простоту конструкції, можливість отримання як надвисоких, так і наднизьких частот обертання, що, з одного боку, багато в чому обумовлюється механічною міцністю ротора двигуна і тим, що двигун позбавлений ковзаючих контактів, з іншого, - електромагнітної редуцією частоти обертання у ВІД і наявністю гнучкої системи управління. Як правило, ротор ВІД володіє малим моментом інерції, що позитивно відображається на динаміці його роботи. ВІД здатний зберігати працездатність навіть в суворих умовах навколишнього середовища в діапазоні зміни навантажень, починаючи від холостого ходу і закінчуючи коротким замиканням. проста конструкція магнітної системи ВІД і зосереджені обмотки, істотно спрощують обмотувальний процес, роблять пристрій двигуна технологічним і відносно дешевим, в порівнянні з аналогами, крім того інтегральне виконання складових системи управління помітно покращує масогабаритні показники машини.

ВІД мають досить широкий діапазоном плавного управління частотою обертання ротора, хорошими динамічними і регульовальними характеристиками, а також більш ніж задовільними енергетичними показниками. Мікропроцесорна система управління ВІД дає можливість використовувати оптимальні алгоритми управління двигуном відповідно до заданого режиму і здійснювати діагностику стану всіх частин системи електроприводу.

До недоліків ВІД відносять підвищений рівень шумів і вібрацій, які виникають через пульсації крутного моменту і дії радіальних сил магнітного тяжіння. Необхідність в датчику положення ротора також вважається одним з недоліків ВІД. Під час роботи ВІД напруги і струми в фазах змінюються за законами, що відрізняється від синусоїдальних, отже, для дотримання вимог, які пред'являються до споживачам електроенергії по віддачі вищих гармонік в мережу, існує необхідність в установці фільтруючих пристроїв.

Однак слід зауважити, що в даний час багато зазначених недоліків успішно усуваються: застосовуються методи непрямого визначення положення

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

ротора (бездатчикового управління), завдяки чому з будови ВІД виключається механічний датчик положення, а шуми і вібрації можуть бути мінімізовані вибором оптимального алгоритму управління і детальним профілюванням зубцеву зони.

На думку іноземних фахівців і вітчизняних дослідників ВІД мають велику перспективу застосування в промисловості, а саме: знаходять широке застосування в сучасному автомобілебудуванні, бульдозерах, в екскаваторному електроприводі, медичному обладнанні, побутовій техніці, робототехніці, металургії, аерокосмічній промисловості та інших областях, в яких конкурує нарівні з іншими типами електричних машин.

					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АНАЛІЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА

## 1.1 Принцип роботи вентиляльно-індукторного двигуна

Вентильно-індукторний двигун (ВІД) - сукупність електромеханічного перетворювача енергії та електронного блоку управління. Електромеханічний перетворювач (рис 1.1) - це синхронна машина, у якій різне число зубців на статорі і роторі. Конфігурація ВІД позначається відношенням  $Z_1 / Z_2$ , де  $Z_1$  число зубців статора, а  $Z_2$  - ротора [1]. У загальному випадку числа зубів статора і ротора визначаються залежністю

$$Z_1 = Z_2 \pm 2 \cdot k, \quad (1.1)$$

де  $k=1,2,3$  - натуральний ряд чисел.

Найпоширеніші конфігурації ВІД: 6/4, 8/6, 10/8, 12/10. Обмотки на статорі виготовляються зосередженими, фаза розташовується на двох протилежних по діаметру зубцях. Число фаз  $m$  визначається з співвідношення (1.2)

$$M = Z_1 / 2. \quad (1.2)$$

Ротор обмоток не має, тобто є пасивним. Електронний блок управління (рис 1.1) включає в себе наступні елементи:

- блок управління комутацією, забезпечує алгоритм управління комутацією фаз ВІД і систему управління електронним комутатором;
- ДПР, в потрібний момент виробляє включення або відключення фаз;
- комутатор, пов'язує джерело живлення і фази;
- датчик струму (в окремих випадках).

Принцип дії ВІД заснований на реактивному взаємодії статорних і роторних зубцевих зон: зубці ротора намагаються зайняти місце щодо порушених зубців статора (вибирається сама симетрична на даний момент пара). Неузгоджені положення зубців - положення, коли зубець розташований навпроти паза, так як в зазорі найбільше опір, індуктивність фази наближена до

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

нуля. Узгоджене становище зубців - зубці знаходяться один навпроти одного, індуктивність фази приймає максимальні значення [3, 4].

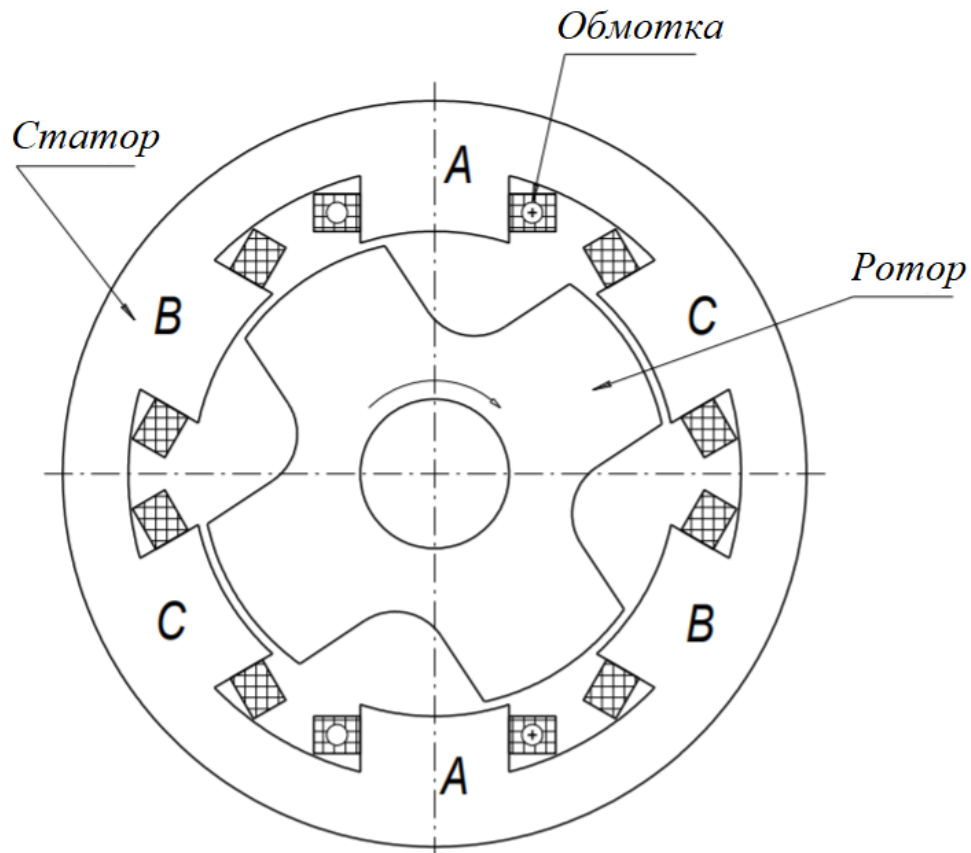


Рис.1.1 Вентильно-індукторний двигун конфігурації 6/4

Співвідношення максимальної і мінімальної індуктивності фаз  $L_{\max}/L_{\min}=7...10$  визначить момент, який розвиває вентиляльно-індукторний двигун.

За своєю структурою ВІД нічим не відрізняється від класичної системи регульованого електроприводу. Саме тому він і має всі її властивості. Однак на відміну від регульованого електроприводу, наприклад з асинхронним двигуном, ІМ у ВІД не є самодостатньою. Вона принципово не здатна працювати без перетворювача частоти і системи управління. Перетворювач частоти і система управління є невід'ємними частинами ІМ, необхідними для здійснення електромеханічного перетворення енергії.

Найбільш доцільно використовувати ВІД як електропривід механізмів, у яких за умовами роботи потрібне здійснення регулювання в широкому

									Арк.
									8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

діапазоні частоти обертання. Прикладом можуть бути електроприводи верстатів з числовим програмним управлінням і промислові роботи.

Ефективність використання ВІД істотно підвищується, якщо необхідність регулювання частоти обертання поєднується з важкими умовами роботи, як це має місце бути в електроприводах для металургії, гірничодобувній промисловості і в рухомому складі електричного транспорту.

У промисловості є великий клас пристроїв і механізмів, які використовують нерегульований електропривод, де енергетична ефективність істотно зростає при використанні регульованого електроприводу. До таких пристроїв, перш за все, відносяться компресори, насоси і вентилятори. Використання тут ВІД є вельми перспективним.

## 1.2 Компоненти джерела живлення ВІД

### 1.2.1 Резонансний інвертор

На рис 1.2 приведена схема однофазного мостового інвертора. Представлена схема є найбільш поширеною схемою даного типу. Форма вихідної напруги визначається видом комутаційної функції вентильного комплекту.

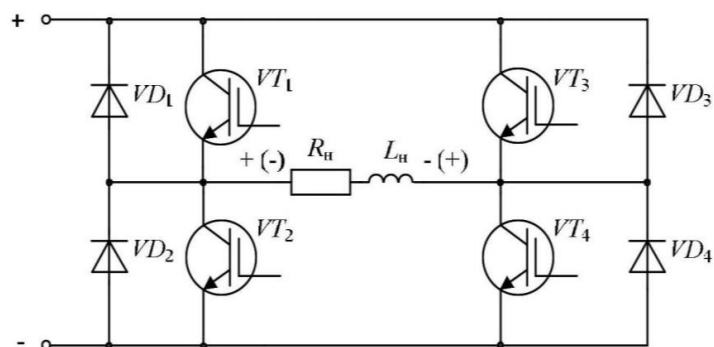


Рис.1.2 Схема однофазного мостового інвертора

Форма вихідної напруги визначається видом комутаційної функції вентильного комплекту. При широтному управлінні по черзі переключаються навхрест лежачі вентилі  $VT_1, VT_4$  і  $VT_2, VT_3$ , так що кожен з них відкритий на

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

180 градусів. При включенні транзисторів  $VT_1, VT_4$  до навантажувального опору і котушці прикладається позитивний напруга. При цьому в навантаженні наростає струм в прямому напрямі, але в даному випадку наявність ЕРС самоіндукції утримує збільшення струму в контурі. У момент  $t_1$  з транзисторів  $VT_1, VT_4$  знімається, а на транзистори  $VT_2, VT_3$  подається зворотня напруга. Напруга прикладається до навантаженні зі зворотнім полярністю. Але струм на даному інтервалі часу продовжує зберігати свій колишній напрямок, це досягається за рахунок енергії, яка накопичена в індуктивності навантаження. Діаграма представлена на рис 1.3.

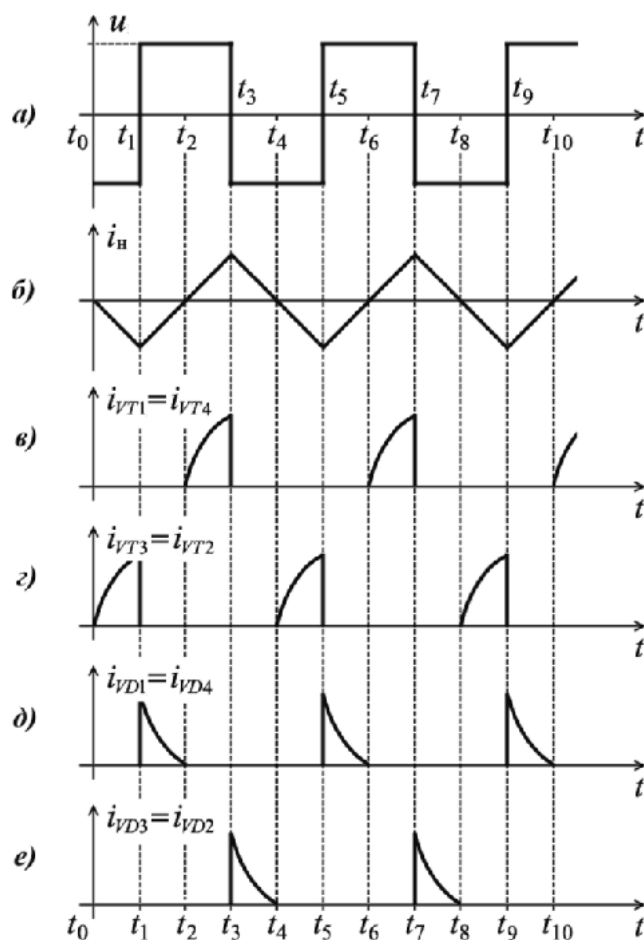


Рис.1.3 Вихідні діаграми

Транзистори  $VT_2, VT_3$  в цьому напрямку проводити не можуть, тому струм протікає через діоди назустріч включеного діодного моста  $VD_2, VD_3$ . У момент  $t_2$  струм навантаження стає рівним нулю, діоди  $VD_2, VD_3$  закриваються і транзистори  $VT_2, VT_3$  починають проводити струм. У момент  $t_3$  відбувається

чергове перемикання транзисторів з  $VT_2, VT_3$  на  $VT_1, VT_4$ . Нормальне функціонування схеми можливо в тому випадку, якщо транзистори  $VT_1, VT_4$  включились до моменту спаду струму навантаження до нуля, що сприяє повторенню всіх процесів, але з протилежного полярністю струму. Процеси протікають аналогічно, на інтервалі  $t_3-t_4$  проводять діоди  $VD_1, VD_4$ , на інтервалі  $t_4-t_5$  транзистори  $VT_1, VT_4$ .

Через малу тривалість процесу комутації вихідна напруга по формі близька до прямокутної і залежить від струму навантаження. У зв'язку з чим зовнішня характеристика інвертора напруги  $U_H = f(I_H)$  виглядає як пряма лінія з дуже малим нахилом.

Вхідний струм інвертора  $I$  при навантаженні  $L_H \neq 0$  змінює знак, що говорить про періодичний енергообмін між ланцюгом навантаження і джерелом живлення.

Тривалість протікання струму через силові напівпровідникові елементи безпосередньо залежить від характеру навантаження: при чисто активному навантаженні зворотні діоди не проводять струм, а тривалість протікання струму через транзистори досягає півперіода. Зі збільшенням індуктивної складової опору навантаження, момент переходу струму навантаження через нуль зміщується назад, тривалість протікання струму через зворотні діоди збільшується, а через транзистори - зменшується. У граничному випадку, при чисто індуктивному навантаженні, струм, змінюючись за лінійним законом, переходить через нуль в момент  $\pi/2$  і тривалість протікання струму в транзисторах і зворотних діодів стають однаковими [5].

Як впливає з аналізу діаграми напруги на колекторі транзистора моста, при виключенні відбувається безпосередньо її наростання, фактично, це відбувається при протіканні повного струму навантаження через силовий ключ. Отже, щоб забезпечити роботу схеми, необхідно використовувати повністю керовані силові напівпровідникові прилади, які можуть забезпечувати примусову комутацію струму. Для використання приладів з неповним керуванням в схемах необхідно доповнювати схему спеціальними вузлами

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

штучної комутації [6], завдяки яким буде формуватися зворотна напруга на діоді. Таке технічне рішення ускладнює силову частину схеми і алгоритми управління, тому цей напрямок є малоперспективним.

Розглянувши роботу інвертора можна зробити наступні висновки:

1) Основними елементами інверторів напруги є зворотні діоди, за допомогою яких відбувається зменшення енергії індуктивного елемента джерела живлення;

2) Джерело живлення повинно мати властивість приймати реактивну енергію при комутаціях;

3) Форма вихідної напруги відрізняється від синусоїдальної і містить вищі гармоніки.

4) Швидкість наростання напруги дуже висока, тому необхідно обмежувати цей параметр. Покращення форми вихідної напруги можна досягти застосуванням фільтрів, налаштованих на певну гармоніку. Такий спосіб в значною мірою погіршує габаритні показники інвертора.

### Способи формування вихідної напруги

Напруга на виході інвертора має мати форму, близьку до синусоїдальної. В іншому випадку зменшується коефіцієнт потужності пристрою, зростають електромагнітні перешкоди. Якщо навантаження мостового інвертора резистивний, вихідна напруга має форму прямокутних імпульсів (рис 1.4).

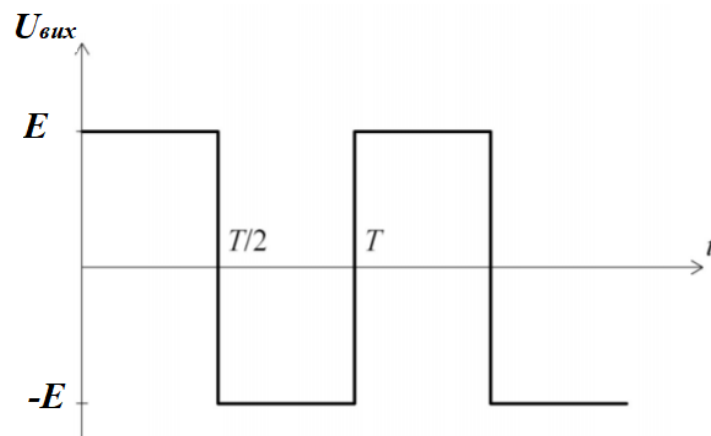


Рис.1.4 Форма вихідної напруги при резистивному навантаженні

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			12

Для зменшення амплітуд гармоніки на виході інвертора включають LC-фільтр нижніх частот (ФНЧ). Схема найпростішого ФНЧ показана на рис 1.5.

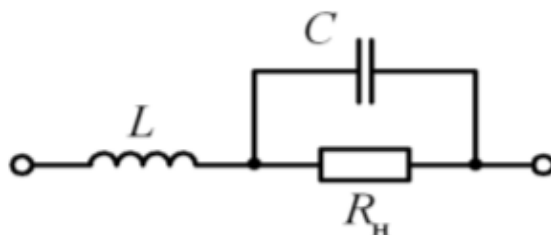


Рис.1.5 Фільтр нижніх частот

Однак використання тільки згладжуючого фільтра виявляється недостатньо ефективним. Для зменшення гармонік, що мають найбільші амплітуди, необхідний фільтр нижніх частот з частотою зрізу, близькою до частоти першої гармоніки. Для реалізації такого фільтра потрібні індуктивна котушка і конденсатор великих номіналів. Відповідно, такий фільтр має великі масу і габарити [7].

Фільтр може мати велику частоту зрізу, і, отже, менші габарити, якщо в спектрі вихідної напруги гармоніки нижчого порядку відсутні. Напругу зі зменшеним вмістом високих гармонік можна отримати за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

### **Широтно-імпульсне регулювання на основній частоті**

При модуляції імпульсна напруга містить тільки один імпульс за половину періоду. Таку напругу ми отримуємо, якщо ключі в схемі замкнуться зі зміщенням в часі. Діаграма, що показує інтервали замикання ключів, зображена в нижній частині рис 1.6.

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

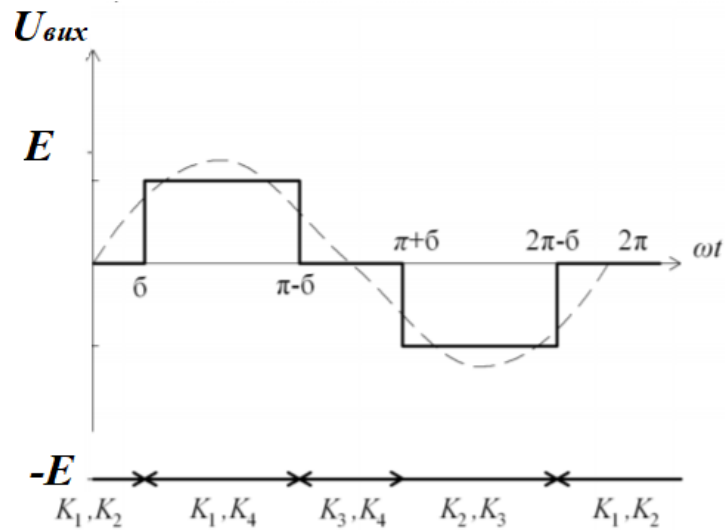


Рис.1.6 Основна частота широтно-імпульсної модуляції

Варіюючи кут включення, можна змінювати амплітуду гармонік.

### Широтно-імпульсне регулювання на підвищеній частоті

У цьому випадку модуляції напруга представляє серію імпульсів за половину періоду. На рис.1.7 показано напругу, що має два імпульси однакової полярності на півперіоді. Напруга такої форми дозволяє виключити дві вищих гармоніки. Однак це не можуть бути одночасно третя і п'ята гармоніки.

Для виключення третього і п'ятого гармонік необхідно напруга, що містить три імпульси на півперіоді [8].

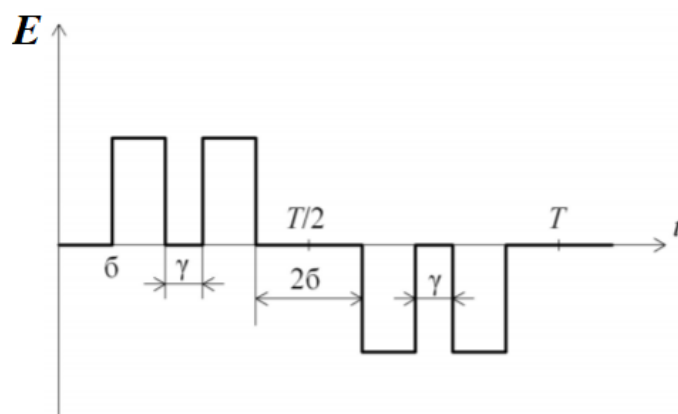


Рис.1.7 Широтно-імпульсна модуляція на частоті комутації

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## Синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція

Інший спосіб виключення вищих гармонік з спектра полягає в модуляції тривалості імпульсів за синусоїдальним законом. Такий спосіб ефективний при великому числі імпульсів на півперіоді основної гармоніки. Форма сигналів широтно-імпульсного модулятора показана на малюнку Рис.1.8.



Рис.1.8 Синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція

Протягом півперіоду циклу перетворення тривалість центрального імпульсу максимальна, а тривалість крайніх імпульсів зменшується. Такий тип ШИМ називається асиметричним, тому що тривалості керуючих імпульсів неоднакові. Вищі гармонійні складові у вихідній напрузі такого інвертора будуть менше, ніж при симетричній широтно-імпульсній модуляції [9].

### 1.2.2 Автономний резонансний інвертор

Для регулювання форми і частоти вихідної напруги інверторах, традиційно, використовується широтно-імпульсна модуляція (ШИМ). Вихідна напруга в схемах з ШИМ має пульсуючу форму. Недолік інверторів з ШИМ полягає в тому, що вони мають значні комутаційні втрати. Ці втрати виникають через те, що в момент комутації напруга і струм ключа не дорівнюють нулю. Одним з способів зменшення комутаційних втрат є проектування схеми інвертора таким чином, щоб комутація ключів здійснювалася при нульовому струмі ( «м'яке» вимикання) або нульовій напрузі ( «м'яке» включення). Такі інвертори називають резонансними. періодичний характер електромагнітних процесів в навантаженні в резонансних інверторах забезпечується завдяки

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

резонансній LC-контурі. Конденсатори, що входять до складу коливального контуру, можуть бути включені з навантаженням послідовно, паралельно і послідовно-паралельно. Порівняно з ШІМ-перетворювачами в резонансних схемах менше комутаційні втрати і нижче перевантаження силових елементів. Для них не потрібні ключі, здатні витримувати великі пікові струми і імпульсні напруги [10]. Відзначимо основні переваги резонансних інверторів перед інверторами з ШІМ [11]:

1. Низькі комутаційні втрати. Наслідком цього є більший ККД.  
2. Більш високі частоти комутації ключів. Це веде до зменшення розмірів магнітних елементів і всього інвертора.

3. Менший рівень електромагнітних перешкод. Резонансні схеми знайшли застосування в потужних тиристорних електроприводах, системах безперебійного живлення, у випадках, коли навантаження змінюється в широких межах (включаючи режим холостого ходу). Однак в малопотужних перетворювачах вони використовуються рідко.

Крім переваг, про які говорилося вище, робота в режимі резонансу напруг дозволяє отримати підвищену вхідну напругу на навантаженні без застосування трансформатора.

Розглянувши різні способи формування синусоїдального сигналу від джерела постійної напруги, можна зробити висновок, що найбільш зручним способом, але при цьому не знайшовши широкого використання, є спосіб резонансних інверторів. Так як використання резонансного інвертора в перетворювачі постійної напруги дозволяє отримати:

- синусоїдальну напругу без використання ШІМ і додаткових фільтрів;
- коефіцієнт посилення більше 1 без використання трансформатора.

### 1.2.3 Мостова схема

Мостова схема являє собою діодний міст.

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			16

Діодний міст - електричний пристрій, призначений випрямлення струму, тобто для перетворення змінного струму в постійний. Його схематичний вид зображено на рис. 1.9.

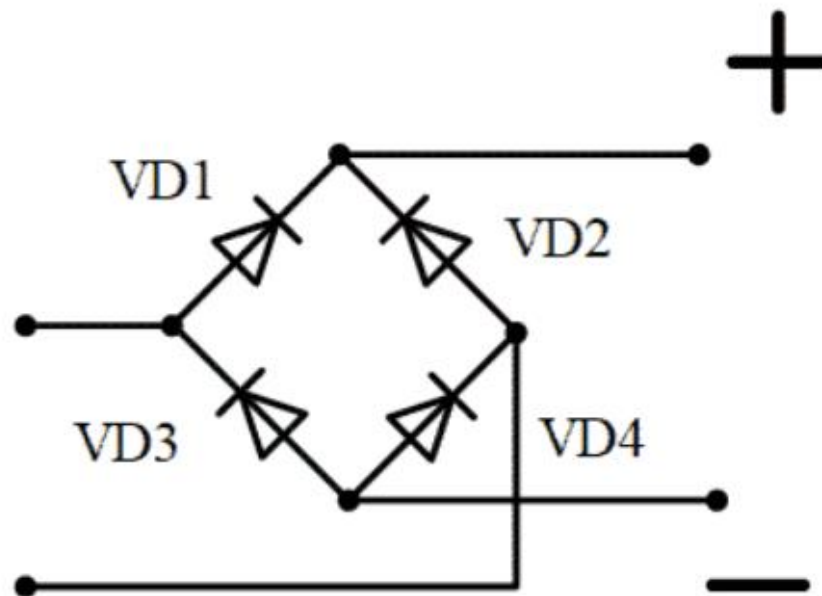


Рис. 1.9. Діодний міст

Діодні мости - важлива частина електронних приладів, що живляться від побутової електромережі напругою 220 В і частотою 50 (60) Гц. Діодний міст складається з напівпровідникових випрямних діодів або діодів Шотткі. Елементи можуть окремо розпаюватися на платі [13]. Однак сучасний варіант - об'єднання діодів в одному корпусі, який носить назву «діодна збірка». Діодні мости активно використовуються в електроніці, трансформаторних і імпульсних блоках живлення, люмінесцентних лампах. В зварювальні апарати встановлюють потужні напівпровідникові збірки, які кріпляться до тепловідвідного пристрою.

### Принцип роботи

На вхід діодного моста подається змінний струм, полярність якого в побутовій електромережі змінюється з частотою 50 Гц. Діодний міст «зрізає» частину синусоїди, яка для приладу «є» зворотною, і змінює її знак на

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

протилежний. В результаті на виході до навантаження подається пульсуючий струм однієї полярності. Частота цих пульсацій в 2 рази перевищує частоту коливальних змінного струму і дорівнює в даному випадку 100 Гц. На Рис 1.10 наведена діаграма роботи діодного моста.

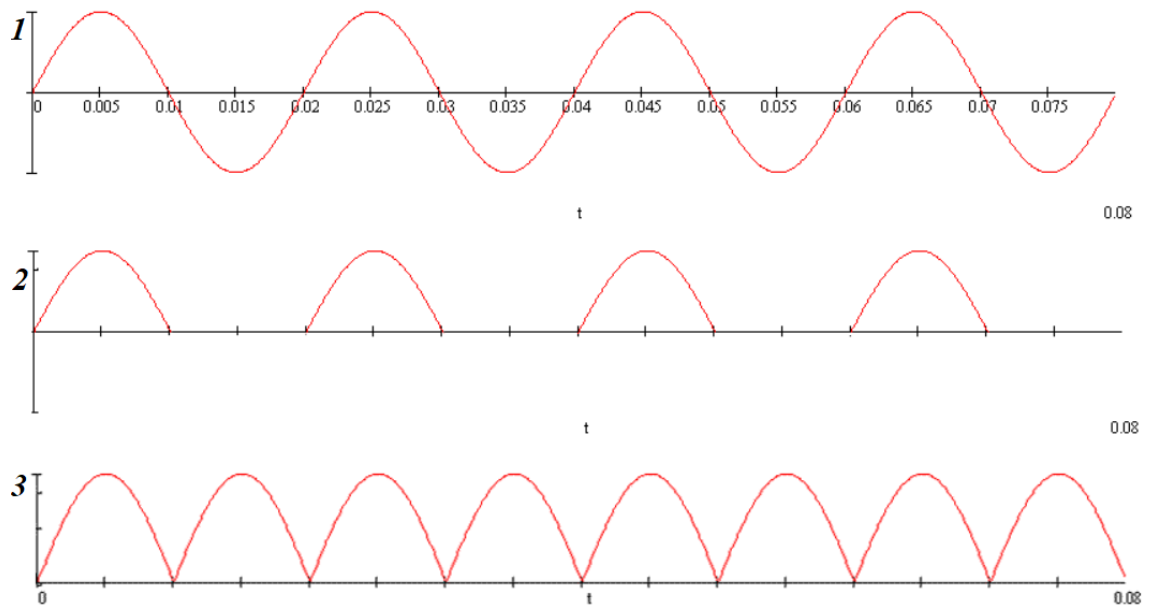


Рис. 1.10 Діаграми роботи діодів

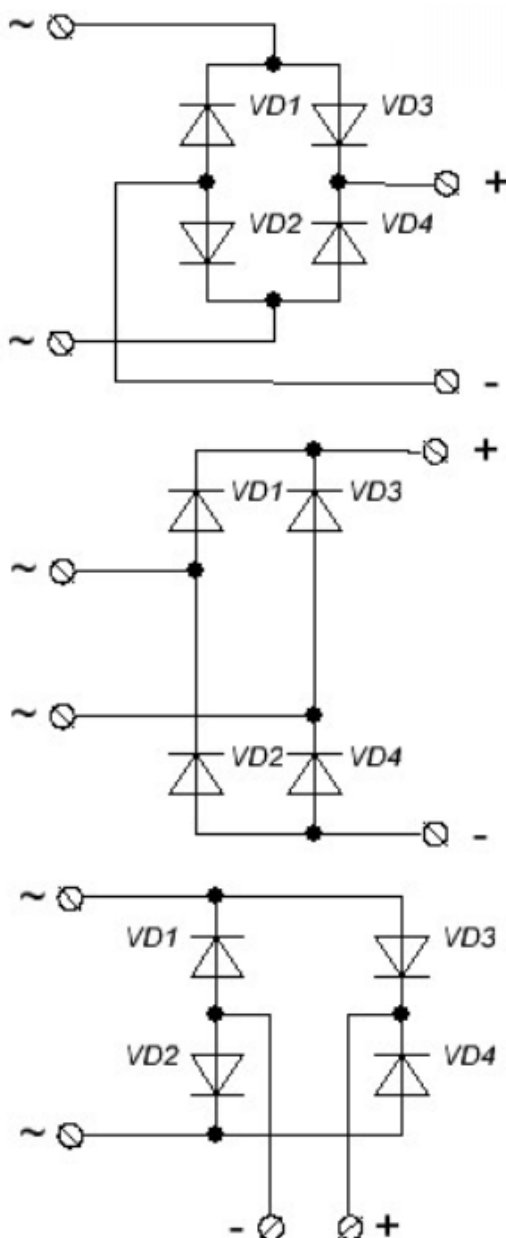
На діаграмі 1 зображена звичайна синусоїда напруги змінного струму. На діаграмі 2 - зрізані позитивні півхвилі, отримані при використанні випрямного діода, який пропускає через себе позитивну півхвилю і закривається при проходженні негативної півхвилі. Як видно, одного діода для ефективної роботи недостатньо, оскільки «зрізана» негативна частина півхвиль втрачається і потужність змінного струму знижується в 2 рази.

Діодний міст потрібен для того, щоб не просто зрізати негативну півхвилю, а і змінити її знак на протилежний. Завдяки цьому, струм повністю зберігає потужність. На 3-й діаграмі - пульсує напруга після проходження струму через діодний міст. Пульсуючий струм назвати постійним не можна. Пульсації заважають роботі електроніки, тому для їх згладжування після проходження діодного моста в схему потрібно включити фільтри [14]. Найпростіший тип фільтра - електролітичні конденсатори значної ємності. На

друкованих платах і принципових схемах діодний міст, в залежності від того, як він улаштований (окремі елементи або збірка), може позначатися по-різному. Якщо він складається з окремо впаяних діодів, то їх позначають літерами VD, поруч з якими вказують порядковий номер - 1-4. Літерами VDS позначають збірки, або -VD.

### Позначення діодних мостів на схемі

На принципових схемах діодний міст може зображуватися по-різному. Дивлячись на рис. 1.11, розуміємо, що все це одна і та ж схема, але зображена вона по-різному.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рис. 1.11 Варіанти позначення діодного моста

Замість діодного моста, зібраного в одному корпусі, можна впаяти в схему 4 кремнієвих випрямних діода або 4 напівпровідника Шоттки. Однак варіант діодного збирання більш ефективний, завдяки: меншій площі, займаній складанням на схемі; спрощенні роботи конструктора схеми; єдиного теплового режиму для всіх чотирьох напівпровідникових пристроїв[15].

### 1.2.4 Трансформатор напруги

Трансформатори незамінні в електроенергетиці, електроніці та радіотехніці. Їх вагомість пояснюється багатофункціональністю, простотою пристрою, високою якістю роботи (ККД - 99%), довговічною експлуатацією.

Трансформатори напруги - це різновид трансформаторів, завдання яких не перетворювач, а гальванічна розв'язка [16].

Від джерела електроенергії струм з високою напругою не може використовуватися споживачами. Щоб знизити його на вході встановлюються понижуючі трансформатори. Вони дають можливість працювати на розрахунковому напрузі для побутової техніки, електроприладів та електроніки. Їх використання дозволяє здійснювати роботу типових вимірювальних приладів. Трансформатор ізолює їх від високого напруги, що вкрай необхідно для їх безпечного обслуговування та експлуатації.

За призначенням вони поділяються на два основних види - підвищуючі і понижуючі. Перетворення напруги в домашніх умовах вкрай необхідно. Побутові прилади, що живляться від мережі 380 або 220 вольт, потребують напрузі в декілька разів менше. Щоб уникнути виходу з ладу побутового обладнання потрібні знижують. При необхідності використовують підвищуючі аналоги[17].

Крім головної функції - перетворення напруги і струму, ТН можуть бути джерелами живлення для автоматики, релейного захисту електроліній від замикання, сигналізацій і т.п. Також вони використовуються в якості показників напруги і потужності.

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

По суті - трансформатор напруги - це статичний електромагнітний прилад, який перетворює змінний струм однієї напруги в змінний струм іншої напруги. За конструктивним рішенням і за принципом дії він подібний до силового аналога[18].

Пристрій трансформатора напруги ТН складаються з двох головних елементів:

- Сталевого муздраттеатру.
- Відокремлених один від одного, ізольованих обмоток (первинної та вторинної).

На первинну обмотку ТН подається струм, а з вторинною він йде до об'єкта споживання.

### **Принцип роботи**

В основі роботи ТН лежить його конструкція і явище електромагнітної індукції, що виникає між елементами:

- Трансформатор під'єднується до мережі. На його первинну обмотку надходить струм.

- Струм змінного характеру проходить по магнітопровода, викликає магнітний потік, який в свою чергу проходить через обидві обмотки і індукуює в них ЕРС.

- До вторинної обмотці надходить струм, що виник під дією ЕРС.

Величина ЕРС тісно пов'язана з числом витків в кожній обмотці. Змінюючи число витків можна збільшити або зменшити напругу, яка йде на споживача з вторинної обмотки.

### **Види трансформаторів напруги**

Існує досить багато трансформаторів напруги. Їх функції відповідають новим призначенням. Тому, перш ніж вибрати той чи інший варіант трансформатора, необхідно визначитися, для чого він потрібен. Все розмаїття

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

цих приладів відрізняється один від одного конструкцією, яка і визначає особливості їх експлуатації.

Весь ТН умовно діляться на види за певними критеріями:

- Число фаз: одно- і трифазні.
- Кількість обмоток - дві або три.
- Клас точності - діапазон допустимих параметрів похибки.
- Тип охолодження - масляні і сухі (повітряне охолодження).
- Спосіб розміщення - внутрішні або зовнішні.

ТН діляться також на групи відповідно до сфер застосування і особливостям експлуатації:

- Заземлений. Цей варіант є однофазним або трифазним пристроєм. Один з його кінців повинен бути заземлений.

- Не заземлений. Він не потребує заземлення. Обов'язково ізолюються всі рівні, затискачі. Залежно від рівня напруги, трансформатор може монтуватися на певній висоті.

- Каскадний. Його основна частина первинна обмотка, що складається з декількох секцій. Вони розташовані на різній відстані від землі в вигляді каскаду. Всі частини трансформатора з'єднані між собою додатковими обмотками. Особливістю каскадних трансформаторів є те, що зі збільшенням числа елементів, збільшується кількість помилок в роботі всієї системи.

- Ємнісний. У цього приладу на відміну від інших є ємнісний дільник. Цей вид пристроїв є пасивним, тому що не додає потужності. Але добре справляється з контролем проходить енергії по мережі і видає високий ККД.

- Двообмотний . Має дві обмотки. Він може перетворювати одну напругу  $U_1$  в іншу  $U_2$ .

- Триобмотковий. Має крім первинної обмотки ще дві вторинні. Відмінно замінює два двообмоткових приладу, що вигідно з точки зору економії витрат на придбання електрообладнання.

									Арк.
									22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ

### 1.3 Структурна схема джерела живлення

Розроблена структурна схема зображена на рис. 1.12.

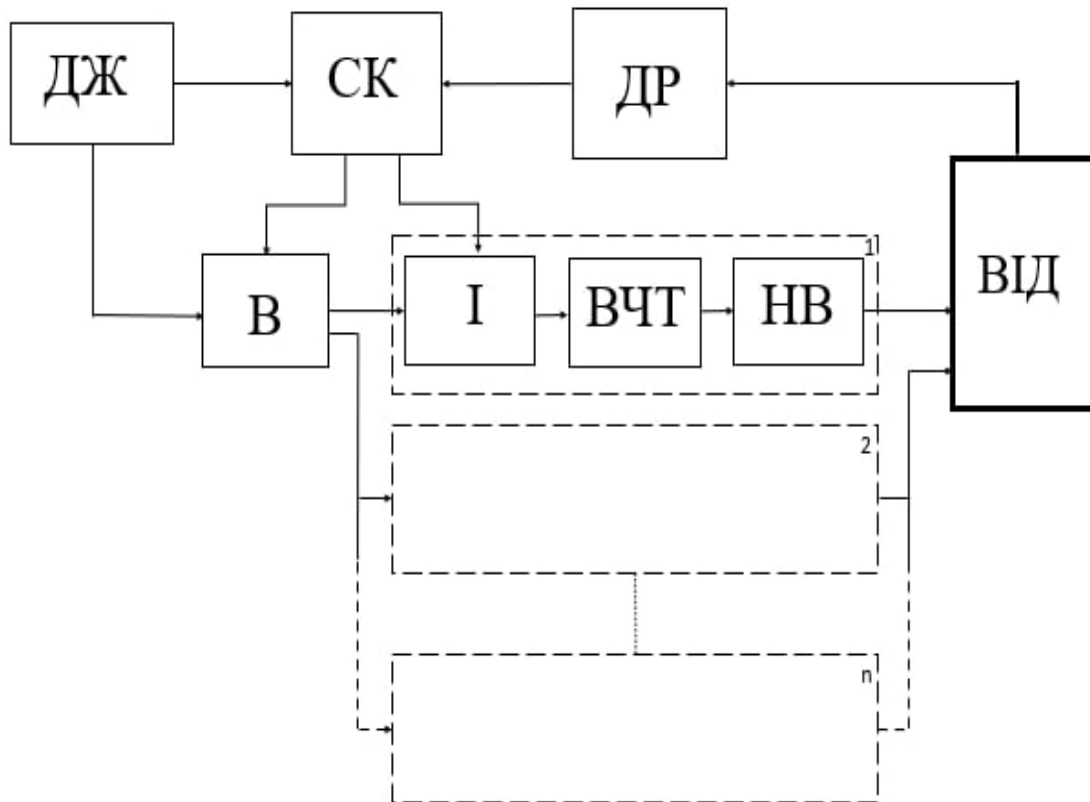


Рис.1.12 Структурна схема пристрою

До структурної схеми входять наступні елементи:

- ДЖ — джерело живлення;
- СК — система керування;
- В — випрямляч;
- І — інвертор;
- ВЧТ — високо частотний трансформатор;
- НВ — нерегульований випрямляч;
- ВІД — вентиляно-індукторний двигун;
- ДР — датчик положення ротора.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Спочатку напруга від мережі напрямляється до випрямляча (В), де відфільтровується і стабілізується. Далі потрапляє до резонансного інвертора (І), перетворюється в змінну напругу високої частоти.

За допомогою високочастотного трансформатора (ВЧТ) реалізується гармонічна розв'язка, і пониження напруги до відповідного рівня, котрий потрібен для керування ветильно-індукторного двигуна (ВІД). Після випрямлення нерегульованим випрямлячем (НВ) сигнал потрапляє безпосередньо на фазу двигуна.

Кількість комірок , котрі складаються з резонансного інвертора (І), високочастотного трансформатора (ВЧТ), нерегульованого випрямляча (НВ), залежить від кількості фаз двигуна.

В структурі ветильно-індукторного двигуна (ВІД) присутній датчик положення ротора (ДР), інформація з якого надходить до системи керування (СК), що являє собою зворотній зв'язок по положенню ротора. Система керування керує вхідним випрямлячем (В) і резонансним інвертором (І).

					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПОБУДОВА І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ВІД

### 2.1 Розробка схеми електричної принципової

На основі структурної схеми було спроектовано принципову схему на основі випрямляча, резонансного інвертора та високочастотного трансформатора.

Напруга мережі 230 В, частота 50 Гц. Випрямляч являє собою IGBT транзистори  $VT_1$ ,  $VT_2$  та діоди  $VD_1$ ,  $VD_2$  та фільтр, що складається з котушки  $L_1$  та конденсатора  $C_1$ .

До складу резонансного інвертора входять: IGBT транзистори  $VT_3$ ,  $VT_4$ ,  $VT_5$ ,  $VT_6$ , діоди  $VD_3$ ,  $VD_4$ ,  $VD_5$ ,  $VD_6$ , котушка  $L_2$  та конденсатор  $C_2$ . Котрий паралельно приєднаний до первинної обмотки високочастотного трансформатора  $TV_1$ . Далі через діодний міст  $VD_7$ ,  $VD_8$ ,  $VD_9$ ,  $VD_{10}$  трансформатор з'єднується з вентиляльно-індукторним двигуном (ВІД).

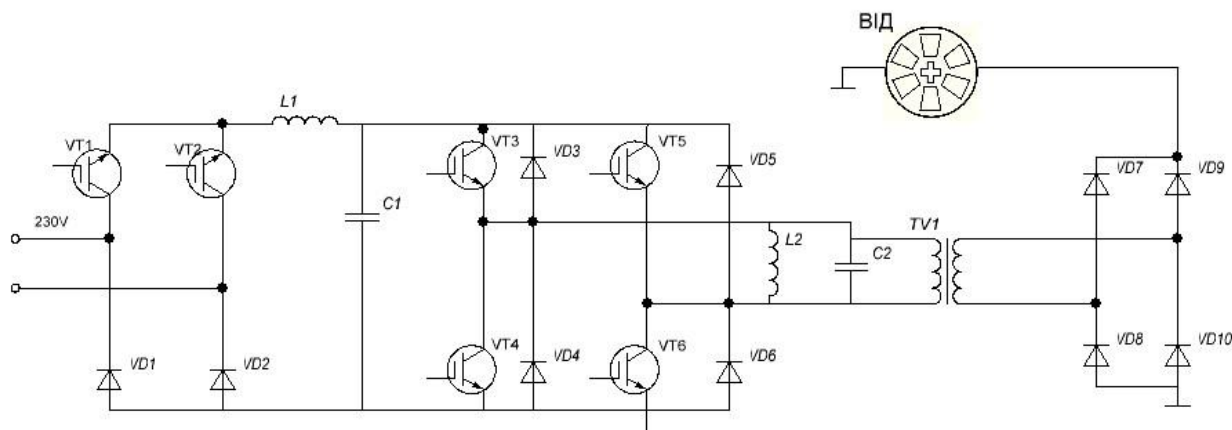


Рис.2.1 Принципова схема пристрою без системи керування

Струми транзисторів резонансного інвертора в момент включення, виключення дорівнюють нулю, внаслідок зменшуються втрати на перемикання в транзисторах. Таким чином, паралельний резонансний інвертор може працювати при великих частотах вихідної напруги, ніж паралельний інвертор струму, де струми транзисторів змінюються стрибком в момент комутації

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			25

вентилів. Переривчастий характер струму в ланці постійного струму інвертора, забезпечує високу швидкість регулювання амплітуди вихідної напруги за рахунок зміни напруги вхідного джерела живлення. Однак цей спосіб призводить до погіршення форми вихідної напруги інвертора при глибокому регулюванні.

Для поліпшення форми вихідної напруги в такому випадку використовують вхідний фільтр, що включається між джерелом живлення і інвертором. Маса і габарити даного фільтра безпосередньо залежать від форми споживаного струму, а точніше від збільшення заряду фільтрового конденсатора [12].

## 2.2. Розрахунок елементів системи живлення

В якості вентильно-індукторного двигуна обраний вже існуючий двигун [19], який має відповідні параметри, що наведені в таб. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри двигуна

Напруга	48В-72В
Потужність	> 400 Вт
Номінальна вихідна потужність навантаження	4000 Вт
Номінальна напруга	72 В
Номінальна швидкість:	4600 об. / Хв
Номінальний струм	65А
Номінальний крутний момент	8.3
Ток без навантаження	23А
Швидкість оберту без навантаження	9600 об. / Хв
Ефективність	85%
Коефіцієнт зменшення	12,5: 1 або 10,5: 1

Відповідно до даних параметрів буде проводитись розрахунок елементів схеми.

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	

## Розрахунок параметрів для схем паралельного LC-фільтра, трансформатора та діодного моста

Розглянемо частину схеми на рис.2.2.

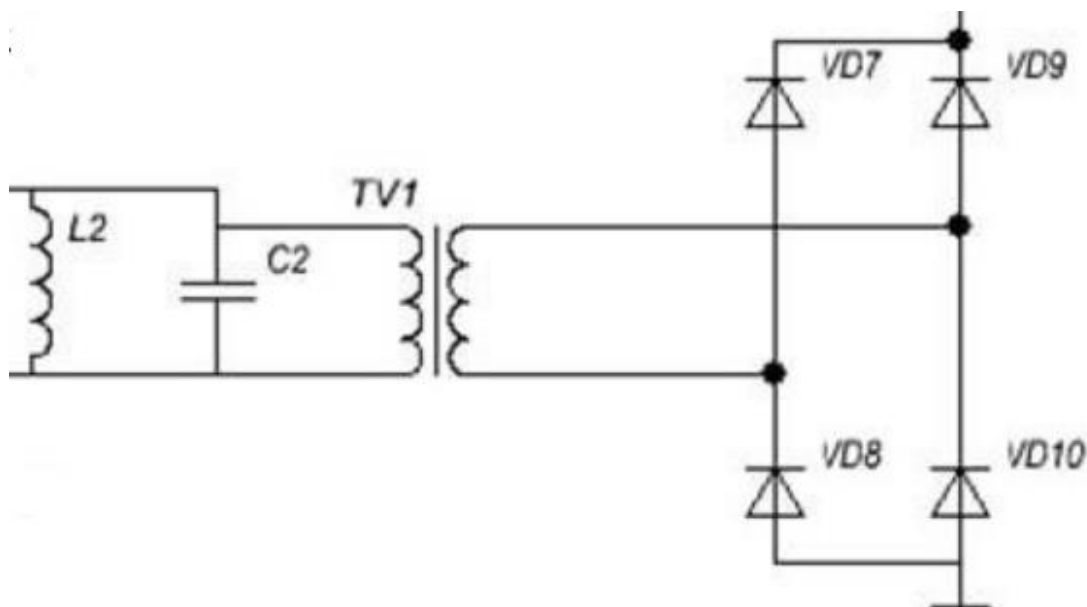


Рис.2.2 Частина схеми трансформатор, фільтр та діодний міст

Маємо схему паралельного коливального контура LC-фільтра 2-го порядку. Частотна залежність коефіцієнта передачі такого LC-контура відповідає характеристиці резонансного смугового фільтра [25].

LC контур являє собою вузькосмуговий смуговий резонансний фільтр,

налаштований на частоту:  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

Знаючи частоту  $f_0 = 50\text{Гц}$ , розрахуємо добуток

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} = \frac{1}{(2\pi 50)^2} \approx 10^{-5}.$$

Оскільки конденсатор, як правило, майже не вносить втрат, добротність контуру дорівнює добротності котушки. Простіше визначити резонансну частоту і добротність експериментально, зібравши каскад за наведеною вище схемою.

					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Покладемо напругу первинної обмотки  $U_1 = U_{вих} = 140B$

Інший спосіб вимірювання добротності полягає у вимірюванні смуги пропускання контуру  $2\Delta f$ , де  $\Delta f$  – відхилення частоти генератора, при якому  $U_{вих}$  падає до 0,7 від резонансного значення :

$$U_{вих} = 0.7U_{ex} \Rightarrow U_{ex} = \frac{U_{вих}}{0.7} = \frac{140}{0.7} = 200B.$$

На резонансній частоті опір контуру визначається співвідношенням

$$r_0 = \frac{U_{ex}}{U_{вих}} = \frac{200}{140} = 1.43.$$

### Розрахунок трансформатора

Розрахуємо параметри трансформатора [26] та підберемо трансформатор, який відповідає необхідним значенням схеми.

Коефіцієнт трансформації відповідає одному із наступних значень схеми:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{140B}{80B} = 1.75$$

Значення струму первинної обмотки

$$k = 1.75 = \frac{I_1}{I_2} \Rightarrow I_1 = 35.75A \cdot 1.75 = 62.5625A$$

Значення споживчої потужності обмоток трансформаторів становлять

$$P_1 = U_1 I_1 = 140B \cdot 62.5625A = 8758.75W;$$

$$P_2 = U_2 I_2 = 35.75A \cdot 80B = 2860W.$$

Значення опорів визначаємо за допомогою формули  $R = \frac{U^2}{P}$ , відповідно значення опорів будуть дорівнювати:

$$R_1 = \frac{U_1^2}{P_1} = \frac{140^2}{8758.75} = 2.24\Omega,$$

$$R_2 = \frac{U_2^2}{P_2} = \frac{80^2}{2860W} = 2.237\Omega.$$

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

## Інвертор з напівпровідниковими ключами. Однорідна комутація.

Частина схеми відповідає інвертору з напівпровідниковими ключами [22,23], як представлено на рис.2.3.

Розглянемо схему однофазного інвертора (рис.2.3, а) з активно-індуктивним навантаженням. Перший півперіод  $\vartheta_1 \leq \vartheta \leq \vartheta_2$  (рис.4, б) транзистори VT1 і VT2 відкриті і навантаження підключене до живлення. На інтервалі  $\vartheta = \vartheta_2$  транзистори VT1, VT2 вимикаються а VT3, VT4 вмикаються.

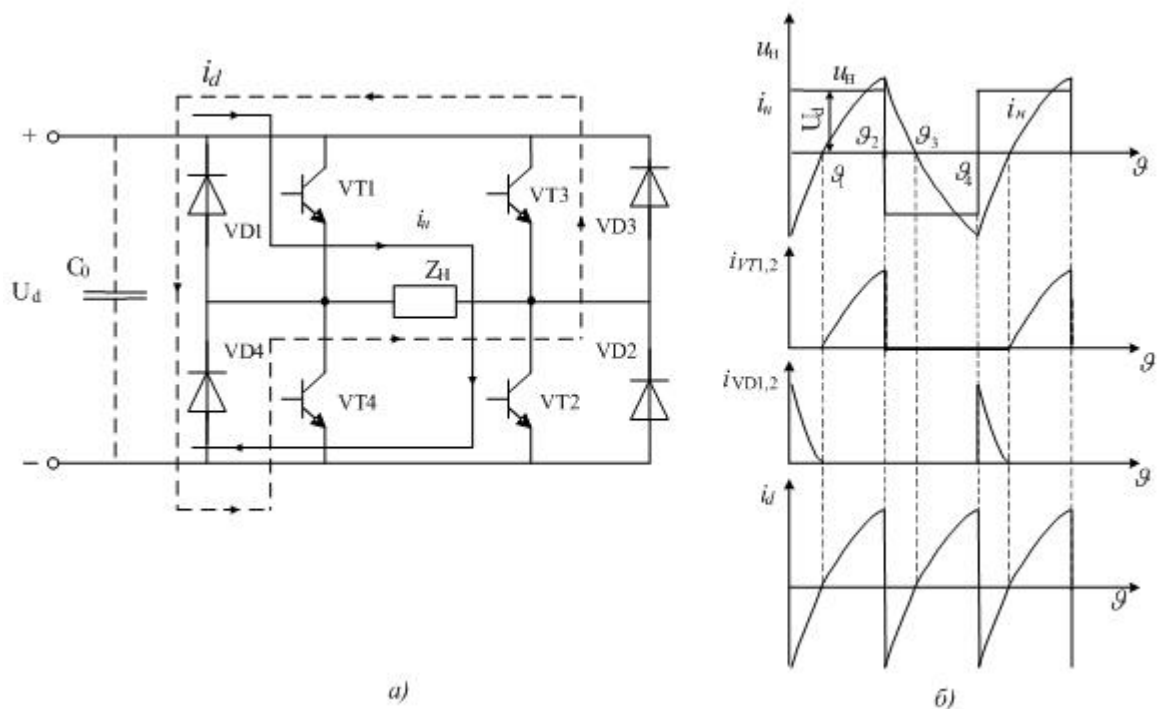


Рис.2.3 Однофазний мостовий інвертор (а) та часові діаграми (б), які пояснюють його роботу

Так як навантаження має активно-індуктивні параметри, то після перемикання транзисторів в результаті е.р.с. самоіндукції струм  $i_L$  в навантаженні тримає свій попередній напрямок, а струм в ланцюзі джерела живлення міняє знак. Зібрана в навантаженні енергія повертається в джерело живлення. З рис.2.3, б видно, що на інтервалі  $\vartheta_2 - \vartheta_3$  (штрихова лінія, рис.2.3, б) струм навантаження проходить через зворотні діоди VD3 і VD4.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для однофазного мостового інвертора операторне зображення еквівалентної е.р.с.  $u_n(p)$ , діючої в схемі що прикладене до навантаження  $Z_n$  визначається таким чином:

$$u_n(p) = \frac{1}{1 - e^{-pT}} \int_0^T e^{-pT} U_d dt = U_d (1 - e^{-p\frac{T}{2}}) / p(1 - e^{-p\frac{T}{2}}) = U_d / p.$$

Беремо максимальне значення

$$u_n(p) = U_d / p = \frac{200V}{p}.$$

Миттєве значення струму навантаження  $i_n(t)$ , яке знаходимо як зворотне перетворювання від  $i_n(p) = u_n(p) / z_n(p)$  має вигляд:

$$i_n(t) = \frac{U_d}{r_n} \left( 1 - \frac{2e^{-\frac{r_n t}{L_n}}}{1 + e^{-\frac{r_n T}{L_n}}} \right).$$

Необхідна індуктивність фільтра, яка забезпечить режим безперервного струму в дроселі фільтра та навантаженні:

$$L_{кр} = \frac{K_{II} r_{d \max}}{m_n^2 \omega^2} = \frac{2 r_{d \max}}{2^2 (2\pi 50)^2} = 5 \cdot r_{d \max} \text{ мкГн},$$

$$L_{кр} = 5 \cdot 0.262 \text{ мкГн} = 1.31 \text{ мкГн}.$$

Або

$$i_n(\vartheta) = I_0 \left( 1 - \frac{2e^{-k\vartheta}}{1 + e^{-k\pi}} \right) = I_0 \left( 1 - \frac{2e^{-k\vartheta}}{1 + a^3} \right) (*)$$

де  $I_0 = \frac{U_d}{r_n}$  – базисний струм;

$k = \frac{r_n}{\omega L_n}$  – параметр навантаження;

$\vartheta = \omega t$  — змінний часовий кут;

$$a = e^{-\frac{k\pi}{3}}.$$

$$I_0 = \frac{200B}{r_n},$$

$$k = \frac{r_n}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot r_{d \max} \text{ мкГн}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \text{ мкГн}} = 636.62,$$

$$\mathcal{G} = 100 \cdot \pi \cdot t,$$

$$a = e^{-\frac{636.62\pi}{3}} = 2.95 \cdot 10^{-290}$$

Головні параметри ланцюга навантаження, ланцюга джерела живлення, а також пристроїв, що входять до складу інвертор, потрібно визначати при різних параметрах навантаження  $k$ .

Діюче значення напруги на навантаженні  $U_n$

$$U_d = U_n = 200B$$

Діюче значення струму навантаження

$$I_H = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_n^2(\mathcal{G}) d\mathcal{G}} = I_0 \sqrt{1 + \frac{2}{k\pi} \frac{a^3 - 1}{a^3 + 1}},$$

$$I_H = I_0 \sqrt{1 + \frac{2}{k\pi} \frac{a^3 - 1}{a^3 + 1}} \approx |a \ll 1| = \frac{200B}{r_n} \sqrt{1 + \frac{2}{k\pi} \frac{-1}{1}} = \frac{200B}{r_n} \sqrt{1 - \frac{2}{636.62\pi}} = \frac{200B}{r_n}.$$

Максимальне значення струму навантаження  $I_{max}$  визначається з (\*), якщо підставити  $\mathcal{G} = \pi$

$$I_{max} = I_0 \frac{1 - a^3}{1 + a^3},$$

$$I_{max} = \frac{200B}{r_n} \frac{1 - a^3}{1 + a^3} \approx |a \ll 1| = \frac{200B}{r_n}.$$

Для отримання середніх і діючих показів струмів транзисторів необхідно знайти момент проходження струму навантаження через нуль (точка  $\mathcal{G} = \sigma$  на рис.2.3, б). Прирівнявши нулю  $i_n(\mathcal{G})$ , знаходимо

$$\sigma = \frac{1}{k} \ln \frac{2}{1 + a^3} = \frac{1}{636.62} \ln \frac{2}{1 + a^3} = 0.0011$$

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середнє  $I_{cepVD}$  і діюче  $I_{VD}$  значення струмів зворотних діодів на інтервалі  $0 \leq \vartheta \leq \sigma$

$$I_{cepVD} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} i_H(\vartheta) d\vartheta = \frac{I_0}{2\pi} \left( \frac{1-a^3}{k(1+a^3)} - \sigma \right) \approx |a \ll 1| = \frac{33B}{r_H} \left( \frac{1}{636.62} - 0.0011 \right) = \frac{15.5 \cdot 10^{-3}}{r_H} A$$

$$I_{VD} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} i_H(\vartheta)^2 d\vartheta} = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{1+2a^3-3a^6}{2k(1+a^3)^2} - \sigma \right)} \approx |a \ll 1, \sigma \ll 1| = \frac{33B}{r_H} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} = \frac{13.165}{r_H} A$$

Середнє  $I_{cepVT}$  і діюче  $I_{VD}$  значення струмів транзисторів на інтервалі  $\sigma \leq \vartheta \leq \pi$

$$I_{cepVT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} i_H(\vartheta) d\vartheta = \frac{I_0}{2\pi} \left( \pi - \sigma - \frac{1-a^3}{k(1+a^3)} \right) = \frac{33B}{r_H} \left( \pi - 0.0011 - \frac{1}{k} \right) = \frac{33B}{r_H} \left( \pi - 0.0011 - \frac{1}{636.62} \right) = \frac{103.6}{r_H} A$$

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\sigma} i_H(\vartheta)^2 d\vartheta} = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \pi - \sigma - \frac{3-2a^3-a^6}{2k(1+a^3)^2} \right)} = \frac{200B}{r_H} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \pi - 0.0011 - \frac{3}{2 \cdot 636.62 \cdot (1)^2} \right)} = \frac{200}{r_H} A$$

Середнє значення струму джерела живлення  $I_d$

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_H(\vartheta) d\vartheta = 2(I_{cepVT} - I_{cepVD}) = I_0 \left( 1 + \frac{2(a^3-1)}{k\pi(1+a^3)} \right) = \frac{200}{r_H} \left( 1 + \frac{2(-1)}{636.62 \cdot \pi(1)} \right) = \frac{200}{r_H} A$$

Активна потужність навантаження  $P$  визначається потужністю, яка споживається від живлення

$$P = U_d I_d = U_d I_0 \left( 1 + \frac{2(a^3-1)}{k\pi(1+a^3)} \right) = \left( \frac{200}{r_H} \right)^2 = \frac{40000}{(r_H)^2}.$$

Спектр вихідної напруги складається з непарного ряду гармонік з їх відносним змістом.

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{(q)}/U_{(1)} = 1/q,$$

де  $U_{(q)}$  - амплітуда гармоніки з номером  $q$ ,

$U_{(1)}$  - амплітуда першої гармоніки.

### Згладжувальний LC-фільтр

Візьмемо Г-подібний індуктивно-ємнісний фільтр [21]. Для згладжування пульсацій потрібно, щоб ємнісний опір конденсатора був менший значення опору навантаження, тобто  $X_{C1} = \frac{1}{m\omega_m C_1} \ll R_H$ , і набагато менший індуктивного опору дроселя

$$X_{C1} = \frac{1}{m\omega_m C_1} \ll m\omega_m L = X_L.$$

Покладемо значення ємності  $C_1$  та індуктивності  $X_L$ .

Таким чином,

$$X_{C1} = \frac{1}{m\omega_m C_1} \ll m\omega_m L = X_L$$

Максимальне значення коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги відповідає куту керування  $\alpha_{\max}$

$$K_{\Pi.\max} = \frac{2}{3} \sqrt{1 + 4(1 + \cos \alpha_{\min})} = \frac{2}{3} \sqrt{1 + 4(1 + 1.06)} = 2.04 \rightarrow (204\%)$$

Для забезпечення заданого та необхідного коефіцієнта пульсацій напруги на навантаженні ( $K_{\Pi} = 2\%$ ) на виході випрямляча потрібно поставити згладжувальний LC-фільтр.

Необхідний коефіцієнт згладжування фільтра

$$K_{згл.} = \frac{K_{\Pi.\max}}{K_{\Pi}} = \frac{2.04}{0.02} = 102.2.$$

Шуканий добуток LC елементів фільтра

$$LC = \frac{K_{згл.}}{m_n^2 \omega^2} = \frac{102.2}{2^2 (2\pi 50)^2} = 259 \text{ мкГн} \cdot \Phi.$$

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потрібна індуктивність фільтра, яка забезпечує режим безперервного струму в дроселі фільтра та навантаженні:

$$L_{кр} = \frac{K_{II} r_{d \max}}{m_n^2 \omega^2} = \frac{2.04 r_{d \max}}{2^2 (2\pi 50)^2} = 5.1 \cdot r_{d \max} \text{ мкГн},$$

де  $r_{d \max}$  – опір навантаження.

Визначаємо ємність фільтра

$$C = \frac{LC}{L_{\phi}} = \frac{259 \text{ мкГн} \cdot \Phi}{5.1 \cdot r_{d \max} \text{ мкГн}} = \frac{50.78}{r_{d \max}} \Phi.$$

Визначаємо режим роботи навантаження при  $\alpha = 0$  і напрузі  $U_{M.\max} = 200 \text{ В}$ .

$$U_{d' \max} = \frac{2\sqrt{2}U_{M.\max}}{\pi} = \frac{2 \cdot 200 \text{ В} \sqrt{2}}{\pi} = 183.34 \text{ В}.$$

### Однофазна мостова схема випрямляча

На позитивній напівхвилі струм тече через  $VD1$ ,  $R_H$  і  $VD3$ . При негативній півхвилі - через  $VD2$ ,  $R_H$  і  $VD4$  [19].

$$U_0 = 0.9U_2 \Rightarrow U_2 = \frac{72 \text{ В}}{0.9} = 80 \text{ В},$$

$$I_0 = 2I_a \Rightarrow I_a = \frac{I_0}{2} = \frac{65 \text{ А}}{2} = 32.5 \text{ А},$$

$$I_{a,\max} = \pi I_a = \frac{\pi}{2} I_0 = 102.102 \text{ А},$$

$$m = 2,$$

$$K_{II} = 0.67.$$

Зворотна напруга на діоді:

$$U_{зв.\max} = 1.57U_0 \Rightarrow U_{зв.\max} = 1.57 \cdot 80 \text{ В} = 125.6 \text{ В},$$

тобто в два рази менше, ніж в двонапівперіодній схемі.

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Діюче значення струму вторинної обмотки:

$$I_2 = 1.1I_0 = 1.1 \cdot 32.5 A = 35.75 A.$$

В якості діода  $VD_1$  використано транзистор  $VT_1$ , як діод  $VD_2$  –  $VT_2$ . Замість діодів  $VD_4$  та  $VD_3$  відповідно обрано діоди  $VD_2$  та  $VD_1$ .

Таким чином, схема зводиться до вигляду як на рис.2.4.

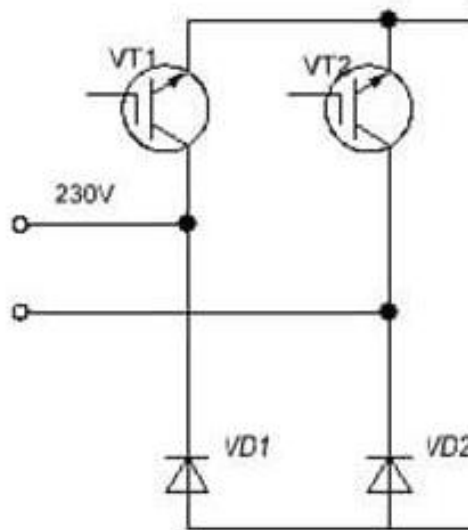


Рис.2.4 Однофазна мостова схема випрямляча згідно з варіантом завданням

Зворотна напруга на транзисторі:

$$U_{зв.маx} = \sqrt{2}U_{ex} = 230\sqrt{2} = 325.27 B,$$

тобто в два рази менше, ніж в двонапівперіодній схемі.

Напруга навантаження

$$U_{зв.маx} = 1.57U_0 \Rightarrow U_0 = \frac{U_{зв.маx}}{1.57} = \frac{325.27 B}{1.57} \approx 207,18 B.$$

Діюче значення струму обмотки:

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R_n} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}I_0 \Rightarrow I_{ex} = \frac{230}{R_n} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}I_0.$$

Вихідна напруга

$$U_{вих} = 0.9U_{ex} = 207 B.$$

						Арк.
					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення коефіцієнту пульсацій та порядку пульсації беремо стандартним для мостової схеми випрямляча

$$K_{II} = 0.67,$$

$$m = 2.$$

визначимо  $U_{\text{випр.мах}}$  [20],

$$U_{\text{випр.мах}} = U_{d \text{ max}} + \Delta U_{\text{вент}} + \Delta U_{\text{др}},$$

де  $U_{\text{вент}}$  — спад напруги на діоді і транзисторі випрямляча;  $U_{\text{др}}$  — спад напруги на активному опорі дроселя фільтра. Звичайно орієнтовно задаються цим спадом напруги на рівні:

$$U_{\text{др}} = (2...4\%)U_d = (2...4\%)207.18B \approx 6.215B.$$

$$U_{\text{випр.мах}} = U_{\text{вент}} + U_d + U_{\text{др}} = 4 + 207.18 + 6.215 = 217.4B.$$

За виразом регулювальної характеристики випрямляча рахуємо мінімальне значення кута регулювання  $\alpha_{\text{min}}$ . Мінімальний кут це мінімальна напруга мережі  $U_{M.\text{min}}$  і максимальне значення випрямленої напруги  $U_{\text{випр.мах}}$

$$\cos \alpha_{\text{min}} = \frac{U_{\text{випр.мах}} \cdot \pi}{\sqrt{2}U_{M.\text{min}}} - 1 = \frac{217.4 \cdot \pi}{230\sqrt{2}} - 1 = 1.06,$$

$$\alpha_{\text{min}} = 86.56^\circ.$$

## Вибір компонентів

### Компоненти мостового випрямляча

Відповідно до отриманих розрахунків, вибираємо діод із зворотною напругою до 400В. Нам підходить діод Д246А. Максимальний струм 10 А, і робоча частота 1,1 кГц.

Також замість діодів  $VD_2$  та  $VD_1$  відповідно можна обрати діоди МІС10А10.

По тих самих даних підбираємо IGBT-транзистор. Гранично-допустима напруга колектор-емітер 330 В. Максимальний постійний струм колектора 20 А.

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
							36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Таким чином, в якості біполярних транзисторів  $v_{T_1}$  та  $v_{T_2}$  обрано транзистори *IRGP50B60PD1*, що відповідають необхідним розрахунковим параметрам схеми.

### Компоненти згладжуючого фільтра

Беремо котушку індуктивності з номінальним значенням 5.1мкГн, а саме RCH106NP-5R1M.

Конденсатор ємністю

$$C = \frac{LC}{L_{\phi}} = \frac{259 \text{ мкГн} \cdot \Phi}{5.1 \cdot r_{d \max} \text{ мкГн}} = \frac{50.78}{r_{d \max}} \Phi = \frac{50.78}{1000000 \text{ Ом}} \Phi = 0.00051 \Phi = 51 \text{ мкФ}.$$

Даному значенню відповідає конденсатор *C4AQIBW5550A3NJ*.

### Компоненти паралельного LC-фільтра

Для номіналу індуктивності  $L_2 = 1 \text{ мГн}$  відповідає котушка RCH106NP.

### Компоненти трансформатора

Розрахованим параметрам трансформатора:

$$P_1 = 38716 \text{ Вт},$$

$$P_2 = 4680 \text{ Вт},$$

$$k = 2.875,$$

$$I_1 = 187 \text{ А},$$

$$I_2 = 65 \text{ А}.$$

відповідає ТДЦ – 250000 / 220.

									Арк.
									37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

### 3 ПОБУДОВА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Побудова схеми системи керування

На рис.3.1 зображена принципова схема системи керування фазою вентиляльно-індукторного двигуна.

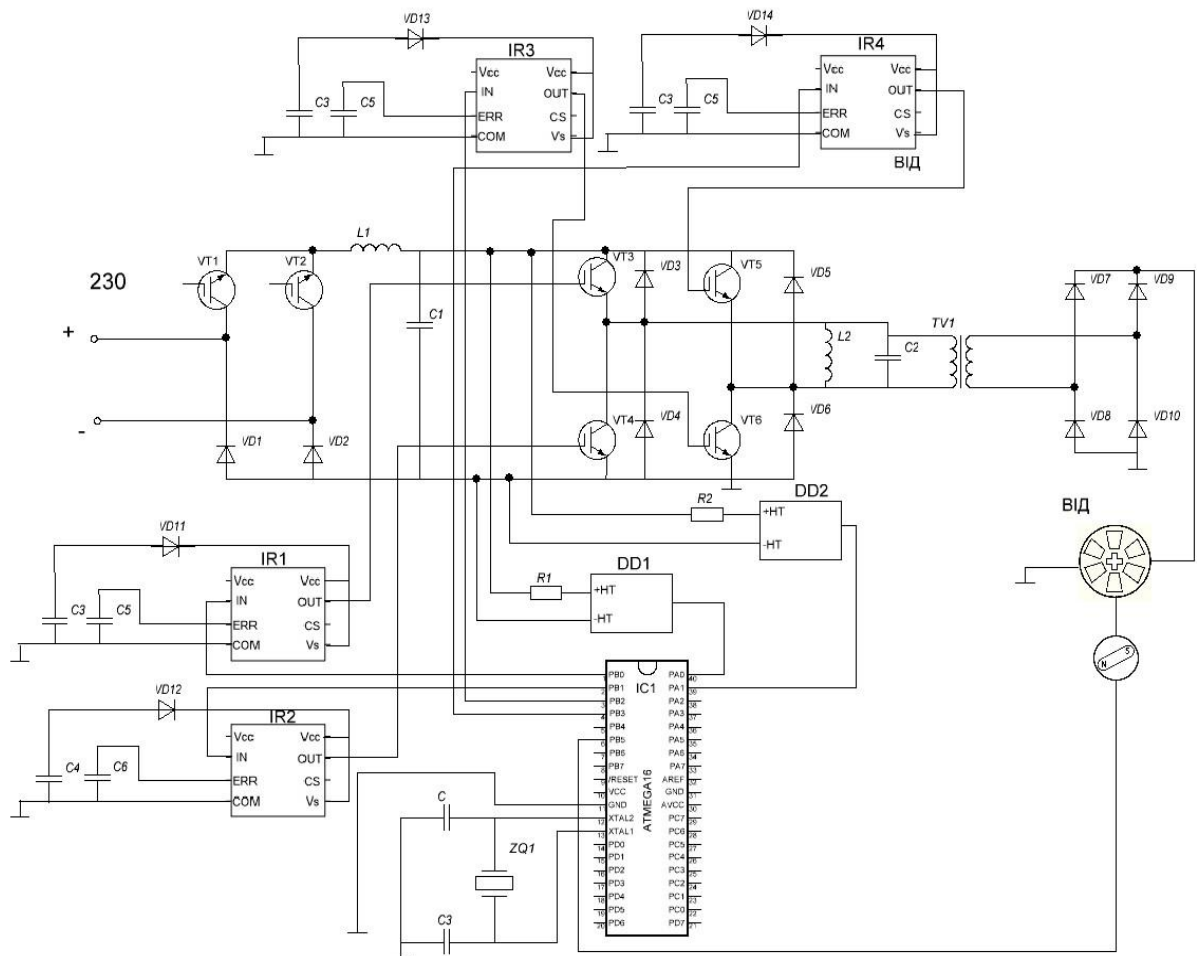


Рис.3.1 Принципова схема системи керування фазою

В якості системи керування використовується мікроконтролер Atmega16 рис.3.2 та допоміжні компоненти схеми.

Кварцевий резонатор ZQ1 підключений замість коливального LC-контур. Він необхідне джерело стабільних гармонічних коливань, завдяки якому мікроконтролер оперує його коливаннями в процесі роботи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

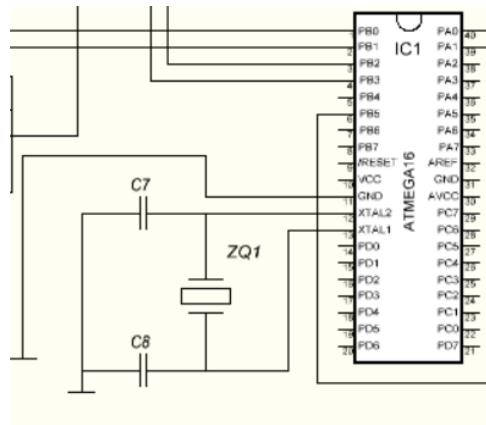


Рис. 3.2 Мікроконтролер Atmega16

Інформація за допомогою датчика положення ротора рис.3.3 передається до мікроконтролера.

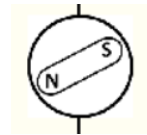


Рис. 3.3 Датчик положення ротора

За допомогою драйверів IR2121 рис.3.3 , відбувається керування IGBT транзисторами.

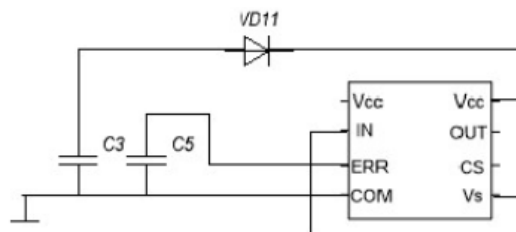


Рис. 3.4 Драйвер IGBT

Датчик напруги рис.3.3 для контролю напруги в системі.

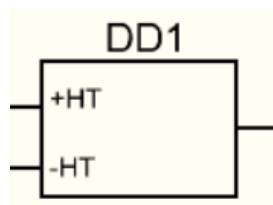


Рис. 3.2 Датчик напруги

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.1 Алгоритм роботи системи керування

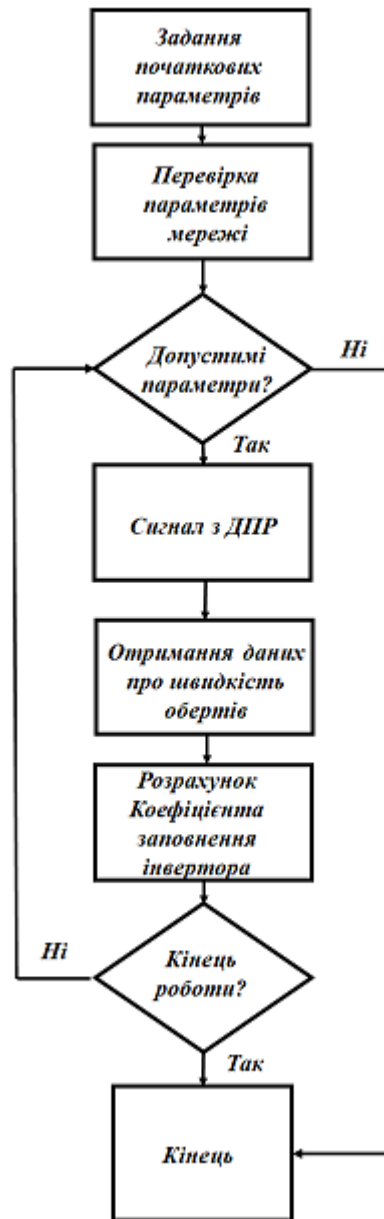


Рис 3.4 Блок-схема системи керування

Система керування містить мікроконтролер, який контролює силовий інвертор згідно заданою програмою управління. В якості силових ключів інвертора застосовано транзистори або IGBT.

Керуючись інформацією, отриманої від ДПР, мікроконтролер формує ШІМ-сигнали, які посилюються інвертором і подаються на обмотку вентильно індукторного двигуна.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Система керування містить силові ключі, силові транзистори з ізолюваним затвором. З них зібрано інвертор напруги.

Інвертором в даному випадку називають електронну систему, яка здійснює подачу напруги частота якого не залежить від частоти напруги живлення на обмотки електродвигуна.

					ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Вентильні індукторні двигуни мають унікальні властивості, принципово відрізняють їх від інших електричних машин, які забезпечує його підвищену живучість. Основні переваги вентильно-індукторного приводу, певні в результаті багаторічного досвіду розробок і досліджень, виконаних як в нашій країні, так і за кордоном:

- Висока перевантажувальна здатність двигуна в пусковому режимі близько 4-х кратної номінальної величини крутного моменту і вище при відповідному виборі-елементної бази перетворювача;
- Найважливішим, з точки зору енергозбереження, перевагою вентильно індукторного двигуна є збереження високого значення ККД, близького до номінального (для великих машин 97-98%), в найпоширеніших режимах роботи з неповним навантаженням на валу. У порівнянні з частотно-регульованим АД індукторний двигун має більш високий ККД (на 3-5%) при таких же масогабаритних показниках, тому що для його управління не потрібно широтно-імпульсна модуляція напруги (ШІМ) на частоті в 2500 Гц.
- Висока швидкодія за рахунок малої інерційності безобмоткового ротора і повністю ферромагнетної системи статора і ротора, точність управління моментом, можливість плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні при фазовому управлінні вентильно індукторного приводу без використання перетворювача DC / DC для регулювання постійної напруги на вході інвертора (необхідного для АД), що також підвищує ККД ВІП;
- Простота конструкції магнітопроводів статора, ротора і котушкові обмоток двигуна, що не мають пересічних лобових частин, забезпечує високу технологічність, підвищені надійність, довговічність і ремонтпридатність (досить замінити одну котушку, що вийшла з ладу);
- Ротор двигуна не містить обмоток, а втрати в сталі ротора незначні, тому від нього не потрібне відведення тепла.

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			42

- Для мінімізації рівня шумів і вібрацій пульсації крутного моменту двигуна без шкоди для ККД можуть бути зведені до 2% і менше оптимізації управління часовими параметрами імпульсу напруги і геометрії двигуна.

В пояснювальній записці розглянуті принцип роботи вентильно-індукторного двигуна і особливості його живлення.

В середовищі Splan розроблена структурна і принципова схеми джерела живлення двигуна. Розраховано та підбрано елементи схеми. Створена схема системи керування на алгоритм дії.

									Арк.
									43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – Москва: Издво Высшая школа, 2015. – 608 с. (рос.)
2. Кузнецов, В.А. К вопросу определения числа витков обмотки фазы вентильного индукторного двигателя / В.А. Кузнецов, А.В. Матвеев // Электротехника. – 2016. - №3. - С.10-15. (рос.)
3. Jurisic, D. Active-RC Filter. Design Using Impedance Tapering / D. Jurisic // Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishin. - 2013. - №1. – P. 1-6. (англ.)
4. Scarpino, M . Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines / M. Scarpino // 1st Edition - USA: Pearson Education. - 2016. - №1. – P. 10-12. (англ.)
5. Перетворювальна техніка : Підручник для студ. вищ. навч. закладів, які навчаються за спец. "Промислова електроніка" Ч2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В.С. Руденка. - Харків : Фоліо, 2000. - 360 с. ил.
6. Булатов О.Г., Олешук В.И. Автономные тиристорные инверторы с улучшенной формой выходного напряжения. — Кишинев: Штиинца, 1980. - 115с. (рос.)
7. Зеленин А.Н, Костромицкий А.И, Бондарь Д.В. Активные фильтры на операционных усилителях. – Х.: Телетех, 2000. - 136 с. (рос.)
8. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Кавун В. Є., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 180. С. 106–120.
9. Rodriguez, J., Lai J-S., Zheng Peng, F., “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 49, No.4, August 2002, pp.724-737. (англ.)

						ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			44

10. Донской А.В., Кулик В.Д. Теория и схемы тиристорных инверторов повышенной частоты с широтно-импульсным регулированием. – Л.: Энергия, 1980. – 158 с. (рос.)
11. Гончаров Ю.П., Ермуратский В.В., Заика Э.И., Штейнберг А.Ю. Автономные инверторы. – Кишинев: Штиинца, 1974. – 336 с(рос.)
12. Костиков В. Г., Парфенов Е. М., Шахнов В. А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для ВУЗов. — 2. — М.: Горячая линия — Телеком, 2001. — 344 с. (рос.)
13. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под общей ред. Н.Н.Горюнова. - М.: Энергоиздат, 1982. - 744 с (рос.)
14. Справочник: Диоды. Под ред. Григорьева О.П., Замятина В.Я. М.: Радио и связь, 1990. (рос.)
15. Понкратова И.А. Электронные преобразователи вагонов – Москва, 2016 г. – 193 с (рос.)
16. Фишлер, Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.А. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 384 с. (рос.)
17. Закс М.И.,Каганский Б.А.,Печенин А.А - Трансформаторы для электродуговой сварки,1988 . (рос.)
18. Силовая электроника: Примеры и расчеты/ Ф.Чаки, И.Герман, И.Ипшич и др. Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 384с., ил.
19. Вентильно-индуктроний двигун [Электронный ресурс]: <https://russian.alibaba.com/product-detail/72v-4000w-high-power-and-big-torque-dc-switched-reluctance-motor-for-electric-cars-60766927653.html>
- 20.
21. «Однофазна мостова схема». Сайт «Студопедія» [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/4193801/page:15/>

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				

22. Хворост М.В., к.т.н., «ВИДИ КОМУТАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З КЛЮЧОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ». Електротехніка і Електромеханіка. 2005. №4. С.67-72.

23. Електроніка та мікросхемотехніка, Керовані випрямлячі, Розрахунково-графічна робота: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», «Інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів» й «Мехатроніка енергоємних виробництв» /К. К. Побєдаш, В. В. Михайленко, К. В. Трубіцин, В. А. Святненко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,76Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 55 с.

24. Дрючин О.О., Рудик А.В., Возняк О.М. Електротехнічні пристрої. Частина 2. Вторинні джерела електроживлення. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ. 2004. 128 с.

25. «Перетворювальна техніка. Частина 2». Ю.П. Гончаров, О.В. Буденный, В.Г. Морозов, Н.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. Под ред. В.С. Руденко. Харьков: Фолио, 2000. 360 с. ISBN 966-03-0697-0.

26. Енергетична електроніка. Сайт [Електронний ресурс]: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/3/22/3-22-b3/part2/part2.html>

27. РАСЧЁТ LC-ФИЛЬТРОВ 2-ГО ПОРЯДКА. Сайт [Електронний ресурс]: <https://vpayuem.ru/information6.html>

28. Розрахунок силового трансформатора. Сайт [Електронний ресурс]: <http://ua.nauchebe.net/2014/11/rozrakhunok-silovogo-transformatora/>

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС71. 02. 000 ПЗ				



**S U M M A R Y**

The power supply of the Switched Reluctance Motor

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Components and Systems Anton Bohomol. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DS-71. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 2021 p., Ill. 19 tables 1.

**Keywords:** Switched Reluctance Motor, DC motors, DC motors.

**Summary of the project:** 4 pages

Currently, in the design of modern electric motors is reduced part of the electric drives of direct current. This can be attributed to the unreliability of the mechanical collector unit and the higher cost of DC motors compared to DC motors. The main alternative to DC collector drives are asynchronous electric drives. At the same time, the theory and practice of electric drives with valve, ie electronically commutated motors, for example, on the basis of the Switched Reluctance Motor (SRM), develops. In foreign scientific and technical literature SRM occurs under the abbreviation SRM (Switched Reluctance Motor). Engines of this type are easy to manufacture, technological and cheap.

Promising SRM manifested itself in the 80s of the twentieth century due to the rapid development of technologies in the electronics industry and, above all, power electronics. A big leap in this direction allowed the industry to begin mass production of a new element base with high performance and speed. Further progress in the field of information technology and computer technology, observed since the 90s of the XX century, finally determined the place of SRM in a number of modern and promising engines for new generation electric drive systems,

allowed to implement complex control algorithms, apply to their creation computer-aided design systems.

Modern SRM is an electric motor that works in conjunction with an electronic converter made of integrated technology and a microprocessor, which allows for optimal motor control with maximum quality of energy conversion and rotor position sensor.

However, like any device, SRM has both advantages and disadvantages.

The advantages include reliability and simplicity of design, the ability to obtain both ultra-high and ultra-low speeds, which, on the one hand, is largely due to the mechanical strength of the motor rotor and the fact that the engine is devoid of sliding contacts, on the other - electromagnetic reduction speed in SRM and the presence of a flexible control system. As a rule, the rotor SRM has a small moment of inertia, which is positively reflected in the dynamics of its operation. SRM is able to maintain performance even in harsh environmental conditions in the range of load changes, from idling to short circuit. Simple design of the magnetic system SRM and concentrated windings, significantly simplify the winding process, make the motor device technological and relatively cheap, compared with analogues, in addition, the integrated design of the control system significantly improves the weight and size of the machine.

SRM have a fairly wide range of smooth rotor speed control, good dynamic and control characteristics, as well as more than satisfactory energy performance. The microprocessor control system SRM gives the chance to use optimum algorithms of control of the engine according to the set mode and to carry out diagnostics of a condition of all parts of system of the electric drive.

The disadvantages of SRM include the increased level of noise and vibration, which occur due to torque pulsations and the action of radial forces of magnetic gravity. The need for a rotor position sensor is also considered to be one of the disadvantages of SRM. During operation SRM voltages and currents in phases change according to the laws differing from sinusoidal, therefore, for observance of requirements shown to the consumers of the electric power on return

of higher harmonics in a network, there is a need for installation of filtering devices.

However, it should be noted that many of these shortcomings are now successfully eliminated: methods are used to indirectly determine the position of the rotor (sensorless control), so the mechanical position sensor is excluded from the structure, and noise and vibration can be minimized by choosing the optimal control algorithm and detailed profiling zones. According to foreign experts and domestic researchers SRM have great prospects for use in industry, namely: are widely used in modern automotive, bulldozers, excavators, medical equipment, household appliances, robotics, metallurgy, aerospace and other areas. along with other types of electric machines.

The principle of operation of the SRM is based on the reactive interaction of the stator and rotor tooth zones: the rotor teeth try to take a place relative to the broken stator teeth (the most symmetrical pair is selected at the moment). Uncoordinated positions of the teeth - the position when the tooth is located opposite the groove, as the gap has the greatest resistance, the phase inductance is close to zero. Coordinated position of the teeth - the teeth are opposite each other, the phase inductance takes the maximum values

In its structure SRM is no different from the classic system of adjustable electric drive. That is why it has all its properties. However, unlike an adjustable electric drive, for example with an induction motor, the MI in the SRM is not self-sufficient. It is fundamentally incapable of operating without a frequency converter and control system. The frequency converter and the control system are integral parts of the IM required for electromechanical energy conversion. I

It is most expedient to use SRM as the electric drive of mechanisms in which under working conditions adjustment in a wide range of frequency of rotation is required. Examples are electric drives of numerically controlled machines and industrial works. The efficiency of SRM use is significantly increased if the need to adjust the speed is combined with difficult working conditions, as is the case in electric drives for metallurgy, mining and rolling stock of electric vehicles. The

industry has a large class of devices and mechanisms that use an unregulated electric drive, where energy efficiency increases significantly when using an adjustable electric drive. Such devices primarily include compressors, pumps and fans. The use of SRM here is very promising.