

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.П. Розен
(підпис) (ініціали, прізвище)

“16” грудня 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів
(код і назва спеціальності)

на тему: Підвищення енергоефективності системи вентиляції будівлі
цивільної призначеності

Виконав: студент 2 курсу, групи _____ ОА-381мп
(шифр групи)

Плева Сергій Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доцент Лебедев Л.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант стартап-проект к.т.н. доцент Шевчук Н.А. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва)

Кафедра Автоматизації управління електротехнічними комплексами
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

«28» жовтня 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Плева Сергій Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема дисертації **Підвищення енергоефективності системи вентиляції будівлі цивільної призначеності**

1.

науковий керівник дисертації Лебедев Л.М. ,к.т.н., доцент _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2020 р. №

2. Строк подання студентом дисертації 16.12.2020

3. Об'єкт дослідження: є режими роботи вентиляційних установок, способи та засоби компенсації реактивної потужності та електропривод з вентильним двигуном.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): є методи та засоби підвищення енергетичних показників вентиляційної установки об'єктів цивільного призначення

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- визначення напрямків підвищення енергетичних показників вентиляційних установок об'єктів цивільного призначення.

- дослідження регулювання якості електроенергії в об'єктах цивільного призначення з нелінійним навантаженням та порівняльний аналіз компенсаторів реактивної потужності.
- вибір схеми електропривода з вентильним двигуном. Дослідження впливу якості напруги живлення на вентильні двигуни.
- дослідження впливу способів керування вентильними двигунами на їх енергетичні режими роботи.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 стаття

8. Дата видачі завдання: 01.10.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір і затвердження теми.	01.10.2020	
2	Підбір і ознайомлення з літературою.	3 02.10 до 12.10 2020	
3	Складання плану, розробка індивідуального завдання на магістерську дисертацію та календарного плану виконання магістерської дисертації	3 13.10 до 18.10 2020	
4	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини магістерської дипломної роботи.	3 19.10 до 10.11 2020	
5	Збір і аналітична обробка статистичних матеріалів з теми дослідження.	3 10.11 до 11.10 2020	
6	Написання магістерської дисертації та її оформлення.	3 11.10 до 02.12 2020	
7	Розробка системи тягового електроприводу	15.11 до 2.12 2020	
8	Розробка стартапу	20.11 до 30.11 2020	
9	Відгук наукового керівника на магістерську дипломну роботу.	03.12	
10	Подання магістерської дисертації в ЕК та її захист.	19.12. до 20.12.2020	

Студент

_____ (підпис)

Сергій ПЛЕВА
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

Лев ЛЕБЕДЕВ
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Підвищення енергоефективності системи вентиляції будівлі цивільної призначеності»

: ____ с., ____ рис., ____ табл., , ____ джерел.

Актуальність теми. Системи вентиляції є невід'ємною частиною споруд об'єктів цивільного призначення і забезпечують необхідні санітарно-технічні норми в приміщеннях та безпеку роботи в них. Споживачі електроенергії торгово-розважального центру (вентилятори, кондиціонери, холодильні установки, насоси) являють собою нелінійне навантаження для мережі живлення змінного струму і є джерелом реактивної потужності, а також генерують в мережу гармоніки кратні частоті мережі і несучій частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертора. Зниження коефіцієнта потужності електропривода збільшує реактивну потужність в електропостачальній системі (ЕПС), що призводить до додаткових втрат напруги та потужності в ній і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. Підвищення рівня електромагнітних перешкод у мережі призводить до збою в роботі інших електронних систем, що працюють у безпосередній близькості від перетворювача частоти та мають спільні з ним шини змінного струму. Одним з найбільш перспективних і універсальних типів електропривода вентиляційних установок є безколекторний або безконтактний вентиляльний двигун (ВД), у якому регулювання швидкості і моменту здійснюється напругою, що підводиться, струмом збудження і кутом випередження вмикання вентилів при самокеруванні по частоті живлення. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму. ВД також мають найвищі енергетичні характеристики і пускові моменти.

Тому тема магістерської дисертації «Підвищення енергоефективності системи вентиляції будівлі цивільної призначеності» є актуальною.

Мета магістерської дисертації. Підвищення енергетичних показників вентиляційних установок з регульованим електроприводом об'єктів цивільного призначення.

Задачі магістерської дисертації.

Визначення напрямків підвищення енергетичних показників вентиляційних установок об'єктів цивільного призначення.

Дослідження регулювання якості електроенергії в об'єктах цивільного призначення з нелінійним навантаженням та порівняльний аналіз компенсаторів реактивної потужності.

Вибір схеми електропривода з вентильним двигуном. Дослідження впливу якості напруги живлення на вентильні двигуни.

Дослідження впливу способів керування вентильними двигунами на їх енергетичні режими роботи.

Об'єктом дослідження є режими роботи вентиляційних установок, способи та засоби компенсації реактивної потужності та електропривод з вентильним двигуном.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення енергетичних показників вентиляційної установки об'єктів цивільного призначення.

Методи дослідження. Проведено дослідження впливу якості напруги живлення на вентильні двигуни та розроблено методи дослідження впливу способів керування вентильними двигунами на їх енергетичні режими роботи.

Наукова новизна одержаних результатів. Означено основні напрямки енергозбереження для вентиляційних установок та складена класифікаційна схема компенсаторів реактивної потужності.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути впроваджені для будівель цивільного призначення та для інших споруд об'єктів цивільного призначення.

Ключові слова: енергозбереження, тяговий електропривод, суперконденсатор, імпульсне регулювання напруги, система керування

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Повышение энергоэффективности системы вентиляции здания гражданского назначения»

: ____ с., ____ рис., ____ табл., ____ источников.

Актуальность темы. Системы вентиляции является неотъемлемой частью сооружений объектов гражданского назначения и обеспечивают необходимые санитарно-технические нормы в помещениях и безопасность работы в них. Потребители электроэнергии торгово-развлекательного центра (вентиляторы, кондиционеры, холодильные установки, насосы) представляют собой нелинейные нагрузки для сети переменного тока и являются источником реактивной мощности, а также генерируют в сеть гармоники кратные частоте сети и несущей частоте широтно-импульсной модуляции (ШИМ) инвертора. Снижение коэффициента мощности электропривода увеличивает реактивную мощность в электроснабжающей системе (ЭПС), что приводит к дополнительным потерям напряжения и мощности в ней и требует увеличения пропускной способности ее элементов. Повышение уровня электромагнитных помех сети приводит к сбою в работе других электронных систем, работающих в непосредственной близости от преобразователя частоты и имеют общие с ним шины переменного тока. Одним из наиболее перспективных и универсальных типов электропривода вентиляционных установок является бесколлекторный или бесконтактный вентильный двигатель (ВД), в котором регулирования скорости и момента осуществляется напряжением, подводимой током возбуждения и углом опережения включения вентилей при саморегулировании по частоте питания. Он регулировочные качества машин постоянного тока и надежность систем переменного тока. ИД также имеют высокие энергетические характеристики и пусковые моменты. Поэтому тема магистерской диссертации «Повышение энергоэффективности системы вентиляции здания гражданского назначения» является актуальной.

Цель магистерской диссертации.

Повышение энергетических показателей вентиляционных установок с регулируемым электроприводом объектов гражданского назначения.

Задачи магистерской диссертации.

Определение направлений повышения энергетических показателей вентиляционных установок объектов гражданского назначения. Исследование регулирования качества электроэнергии в объектах гражданского назначения с нелинейной нагрузкой и сравнительный анализ компенсаторов реактивной мощности. Выбор схемы электропривода с вентильным двигателем. Исследование влияния качества напряжения питания на вентильные двигатели. Исследование влияния способов управления вентильными двигателями на их энергетические режимы работы. **Объектом исследования** являются режимы работы вентиляционных установок, способы и средства компенсации реактивной мощности и электропривод с вентильным двигателем.

Предметом исследования являются методы и средства повышения энергетических показателей вентиляционной установки объектов гражданского назначения.

Методы исследования.

Проведено исследование влияния качества напряжения питания на вентильные двигатели и разработаны методы исследования влияния способов управления вентильными двигателями на их энергетические режимы работы. Научная новизна полученных результатов. Отмечено основные направления энергосбережения для вентиляционных установок и составлена классификационная схема компенсаторов реактивной мощности.

Практическое значение полученных результатов.

Результаты работы могут быть внедрены для зданий гражданского назначения и для других сооружений объектов гражданского назначения. Ключевые слова: энергосбережение, регулируемый электропривод, вентильный двигатель, компенсация реактивной мощности

SUMMARY

Master's thesis on "Improving the energy efficiency of the ventilation system of civil buildings »: ____ p., ____ fig., ____ table., ____ sources.

Actuality of theme. Ventilation systems are an integral part of civilian buildings and provide the necessary sanitary and technical standards in the premises and safety in them. Electricity consumers of the shopping and entertainment center (fans, air conditioners, refrigeration units, pumps) are a nonlinear load for the AC power supply and are a source of reactive power, as well as generate in the harmonic network multiples of network frequency and pulse width modulation (PWM). inverter. Reducing the power factor of the electric drive increases the reactive power in the power supply system (EPS), which leads to additional voltage and power losses in it and requires an increase in the capacity of its elements. Increasing the level of electromagnetic interference in the network leads to the failure of other electronic systems that operate in close proximity to the frequency converter and have common AC buses. One of the most promising and universal types of electric ventilation systems is a collectorless or non-contact valve motor (VD), in which the speed and torque are regulated by the supply voltage, excitation current and advance angle of the valves when self-controlling the supply frequency. It has the regulating qualities of DC machines and the reliability of AC systems. VD also have the highest energy characteristics and starting torques. Therefore, the topic of the master's dissertation "Improving the energy performance of ventilated installations with adjustable electric drive of civil facilities" is relevant.

The purpose of the master's dissertation.

Improving the energy performance of ventilated ventilation systems with adjustable electric drive of civil facilities.

Tasks of the master's dissertation.

Determining the directions of increasing the energy performance of ventilation systems of civil facilities. Research of electricity quality regulation in civil facilities with nonlinear loading and comparative analysis of reactive power compensators. Choice of the scheme of the electric drive with the valve engine. Investigation of the influence of supply voltage quality on valve motors. Research of influence of ways of management of valve engines on their power modes of work. The object of the study are the modes of operation of ventilation systems, methods and means of reactive power compensation and electric drive with a valve motor. The subject of the research is methods and means of increasing the energy performance of the ventilation installation of civil facilities.

Research methods.

A study of the influence of supply voltage quality on valve motors and methods for studying the influence of valve motor control methods on their power modes. Scientific novelty of the obtained results. The main directions of energy saving for ventilation systems are defined and the classification scheme of reactive power compensators is made.

The practical significance of the obtained results. The results of the work can be implemented for civil buildings and other structures of civil facilities. Keywords: energy saving, electric traction drive, supercapacitor, pulse voltage regulation, control system

ЗМІСТ

Стр.

ПЕРЕЛІК КОРОЧЕНЬ.....	
ВСТУП.....	
1 НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК ОБ'ЄКТІВ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	
1.1 Загальні відомості про вентиляцію.....	
1.2 Класифікація систем вентиляції.....	
1.3 Класифікація вентиляторів.....	
1.4 Режими роботи вентилятора в мережі.....	
1.5 Шляхи зниження електроспоживання вентиляційними установками	
2 РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОБ'ЄКТАХ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ....	
2.1 Загальні положення.....	
2.2 Зниження рівнів вищих гармонік засобами мережі живлення...	
2.3 Активні фільтри.....	
2.4 Використання традиційних засобів компенсації реактивної потужності (синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів)	
2.5 Компенсація реактивної потужності на базі транзисторних перетворювачів.....	
2.6 Регулятори реактивної потужності.....	
2.7 Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ.....	
2.8 Імітаційна модель системи управління компенсатора реактивної потужності і потужності спотворень на базі багаторівневого каскадного інвертора.....	
3 ВИБІР СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ.....	

3.1 Стан питання.....	
3.2 Аналіз систем електроприводів з вентильними двигунами.....	
3.3 Способи управління вентильним двигуном.....	
3.4 Математична модель синхронної машини.....	
3.5 Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи із синхронними двигунами.....	
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ НА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ.....	
4.1 Гармонічний аналіз струмів і напруг вентильних двигунів.....	
4.2 Оцінка якості перетворення енергії перетворювачами вентильних двигунів.....	
4.3 Вибір силового електрообладнання електроприводу з вентильними двигунами.....	
5 СТАРТАП- ПРОЕКТ	
5. 1 . Цілі та етапи реалізації стартап-проекту.....	
5.2 Обґрунтування актуальності та новизна інноваційної ідеї стартап-проекту	
5.3 Аналіз конкурентного середовища	
5.4 Обґрунтування ресурсного забезпечення проекту.....	
5. 5 Ключові види діяльності та партнери.....	
5.6 Прямі матеріальні витрати.....	
5.7 Інші прямі витрати.....	
5.9 Канали збуту.....	
5.10 Бізнес-модель проекту.....	
5.11 Термін окупності стартап-проекту та висновки.....	
Висновки до магістерської дисертації.....	
Перелік посилань.....	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії;
ВД – вентильний двигун;
СД – синхронний двигун;
АД – асинхронний двигун;
ЧРП - частотно-регульований привод;
ЕПС - електропостачальна система;
ЕМС – електромеханічна система;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ВГ – вищі гармоніки;
КРП – компенсація реактивної потужності;
АФ – активні фільтри;
АБП - акумуляторна батарея – перетворювач;
БК - батареї конденсаторів;
СК – синхронний компенсатор;
РРП - регулятор реактивної потужності;
ККП – коректор коефіцієнта потужності;
ДПР - датчик положення ротора;
СІФУ - системи імпульсно-фазового управління;
СМ – синхронна машина;

ВСТУП

Системи вентиляції є невід'ємною частиною споруд об'єктів цивільного призначення і забезпечують необхідні санітарно-технічні норми в приміщеннях та безпеку роботи в них.

Споживачі електроенергії торгово-розважального центру (вентилятори, кондиціонери, холодильні установки, насоси) являють собою нелінійне навантаження для мережі живлення змінного струму і є джерелом реактивної потужності, а також генерують в мережу гармоніки кратні частоті мережі і несучій частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертора. Зниження коефіцієнта потужності електропривода збільшує реактивну потужність в електропостачальній системі (ЕПС), що призводить до додаткових втрат напруги та потужності в ній і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. Підвищення рівня електромагнітних перешкод у мережі призводить до збою в роботі інших електронних систем, що працюють у безпосередній близькості від перетворювача частоти та мають спільні з ним шини змінного струму.

Одним з найбільш перспективних і універсальних типів електропривода вентиляційних установок є безколекторний або безконтактний вентильний двигун (ВД), у якому регулювання швидкості і моменту здійснюється напругою, що підводиться, струмом збудження і кутом випередження вмикання вентилів при самокеруванні по частоті живлення. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму. ВД також мають найвищі енергетичні характеристики і пускові моменти.

ВД є універсальним типом приводу з найкращими регульовальними характеристиками. Пуск за схемою ВД забезпечує будь-яку необхідну плавність розгону.

1 НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК ОБ'ЄКТІВ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Загальні відомості про вентиляцію

У зв'язку з надходженням на ринок сучасного вентиляційного обладнання із-за кордону відбувся поштовх у розвитку економічних і прогресивних способів створення та підтримання нормованих параметрів повітряного середовища приміщень громадських будівель і споруд.

Головним завданням вентиляції є створення і підтримування нормованих параметрів та чистоти повітряного середовища. Виходячи з цього, до вентиляції ставляться як санітарно-гігієнічні, так і технологічні вимоги.

Під *вентиляцією* розуміють сукупність заходів та обладнання, які забезпечують розрахунковий повітрообмін у житлових, громадських приміщеннях та промислових спорудах з метою дотримання санітарно-гігієнічних і технологічних вимог.

Санітарно-гігієнічне призначення вентиляції полягає у створенні та підтримуванні в приміщенні стану повітряного середовища, який задовольняє вимоги санітарних та будівельних норм проектування будівель і споруд різного призначення шляхом поглинання (асиміляції) надлишків теплоти та вологи припливним повітрям, розбавленням ним до гранично допустимої концентрації (ГДК) газоподібних шкідливих домішок, а також видалення пилу та інших шкідливих домішок з повітрям, що видаляється за межі приміщення.

Технологічні вимоги до вентиляції вирішують проблему чистоти та забезпечення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у приміщенні з метою можливості перебігу технологічних процесів. Наприклад, надвисока чистота повітря необхідна у приміщеннях радіоелектронної та радіотехнічної галузей, необхідна відносна вологість потрібна для отримання нитки без поривів та сукання у текстильній промисловості тощо.

Гази та пари шкідливих речовин надходять у повітря приміщені, при технологічних процесах, при диханні людини та при випаровуванні з поверхні тіла організму. Фізіологічна дія різних газів та пару залежить від їх токсичності, концентрації у повітрі, а також від часу перебування людини у забрудненій атмосфері. Концентрація шкідливої речовини - це її маса в одиниці об'єму (мг/м³; г/м³; кг/м³) [1].

На рис.1.1 показано області оптимальних і допустимих параметрів повітря у житлових і громадських будівлях для теплого (Т) та холодного (Х) періодів року.

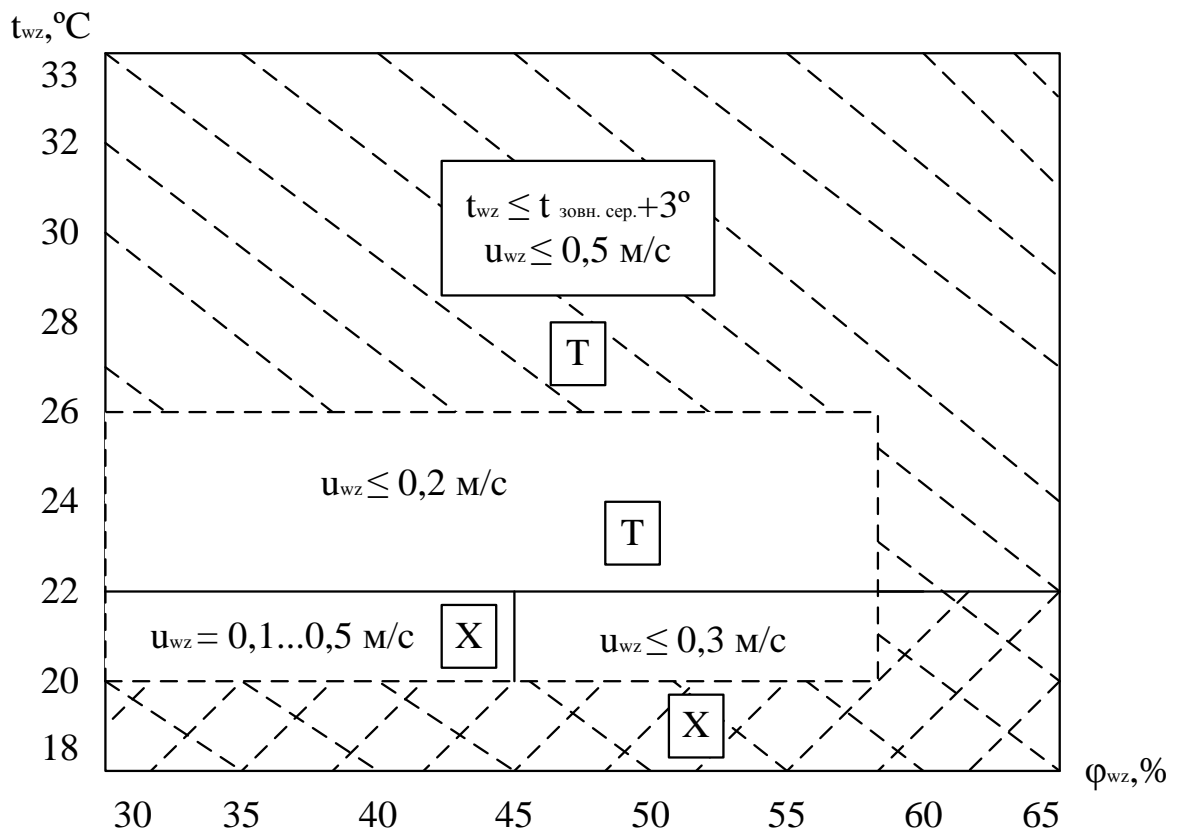


Рисунок 1.1 - Области оптимальних і допустимих параметрів повітря у житлових і громадських будівлях для теплого (Т) та холодного (Х) періодів року (заштриховано - для допустимих параметрів, не заштриховано - для оптимальних).

1.2 Класифікація систем вентиляції

Сучасні системи вентиляції не тільки оновлюють повітря в приміщенні, вони можуть також очищати повітря, що подається, зволожувати його, нагрівати або охолоджувати до потрібної температури, створюючи в приміщенні найбільш комфортні для людини умови.

Системи вентиляції класифікуються за наступними основними ознаками:
за способом переміщення повітря - природна або штучна (механічна) системи вентиляції;

за призначенням - припливна або витяжна;

по зоні обслуговування - місцева або загальнообмінна;

за конструктивним виконанням - набірна або моноблочна.

Природна і механічна вентиляція

Природна вентиляція - це система вентиляції, що не містить електроустаткування (вентиляторів, двигунів, приводів і т.п.). Переміщення повітря в ній відбувається за рахунок різниці температур, тиску зовнішнього повітря і повітря в приміщенні, вітрового тиску. Природна вентиляція існує у всіх багатоповерхових будинках - це система вертикальних каналів (повітроводів) з вентиляційними решітками на кухнях і в санвузлах.

У механічних системах вентиляції використовується устаткування і електроприлади, що дозволяють переміщати повітря на значні відстані, а також при необхідності очищати і нагрівати його. Механічні системи здатні забезпечити потрібний рівень повітрообміну незалежно від зовнішніх умов, але і коштують вони недешево, та витрати електроенергії на їх роботу можуть бути досить великими.

Припливна і витяжна вентиляція

Припливна система служить для подачі в приміщення свіжого повітря. Припливне повітря може піддаватися спеціальній обробці - очищення, нагрівання, зволоження. Витяжна система видаляє з приміщення відпрацьоване повітря. Зазвичай в приміщенні передбачаються як припливні, так і витяжні

системи; їх продуктивність повинна бути збалансована, інакше в приміщенні буде утворюватися недостатній або надлишковий тиск.

У приміщеннях може бути також передбачена тільки витяжна або тільки припливна система вентиляції. У цьому випадку повітря поступає в дане приміщення зовні або із суміжних приміщень через спеціальні прорізи або видаляється з даного приміщення назовні, або перетікає в суміжні приміщення. Як припливна, так і витяжна вентиляція можуть влаштовуватися на робочому місці (місцева вентиляція), або для всього приміщення (загальнообмінна вентиляція).

Набірна і моноблочна системи вентиляції

Найбільш поширеними є набірні системи вентиляції. Вони збираються, як конструктор, з окремих елементів (вентилятора, фільтра, шумоглушника, повітроводів і т.д.), причому елементи можуть бути від різних виробників. Набірна система може бути спроектована для будь-якого приміщення, від невеликої квартири до цілої будівлі, але грамотно розрахувати та спроектувати її зможе тільки фахівець.

Моноблокова установка - це готова система вентиляції, що знаходиться цілком в одному корпусі. У моноблочній системі нерідко встановлений рекуператор - пристрій, в якому відбувається теплообмін холодного припливного повітря з теплим повітрям, що видаляється з приміщення, що дозволяє економити від 30 до 90% електроенергії [1].

1.3 Класифікація вентиляторів

За конструкцією і принципом дії вентилятори підрозділяють: радіальні, (відцентрові), осьові, діаметральні;

За функціональним призначенням і застосовності існує кілька різновидів вентиляторів :радіальні вентилятори , осьові вентилятори, дахові вентилятори,

вентилятори димовидалення, круглі каналні вентилятори, прямокутні каналні вентилятори, вентилятори в ізолюваному корпусі, вибухозахищені вентилятори, відцентрові вентилятори.

Радіальні вентилятори. Являють собою розташоване в спіральному кожусі лопатка (робоче) колесо, при обертанні якого повітря, що потрапляє в канали між лопатками його, рухається в радіальному напрямку до периферії колеса і стискується [2].

Під дією відцентрової сили він відкидається в спіральний кожух і далі прямує в нагнітальні отвір. Робоче колесо - основний елемент радіального вентилятора, являє собою порожнистий циліндр, в якому по всій бічній поверхні, паралельно осі обертання, встановлені на рівних відстанях лопатки. Лопатки скріплені по колу за допомогою переднього і заднього дисків, в центрі яких знаходиться маточина для насадження робочого колеса на вал [1].

Відцентрові вентилятори. Відцентрові вентилятори рекомендується використовувати в вентиляційних установках високого тиску, з високими витратами повітря і для задоволення потреб у низькому шумі. Складається із крильчатки, розміщеної в спіральному кожусі. Цей кожух має два призначення: направляти потік повітря від крильчатки до точки виходу (включає направляючі лопатки) і перетворювати кінетичну енергію в статичний тиск.

В системах механічної вентиляції застосовують вентилятори: низького тиску (до 1 кПа); середнього тиску (від 1 до 3 кПа); високого тиску (від 3 до 12 кПа).

Вентилятори низького та середнього тиску застосовують в вентиляційних установках та установках кондиціювання повітря, а вентилятори високого тиску – в технологічних установках.

В залежності від умов експлуатації, вентилятори виготовляють: в звичайному виконанні - для переміщення чистого та мало запиленого повітря з температурою до 80°C ; антикорозійного виконання – для переміщення повітря з домішками, яке руйнує звичайну сталь; іскрозахищеному виконанні – для переміщення горючих речовин та вибухонебезпечних сумішей.

В залежності від місця встановлення, вентилятори розділяють: звичайні, які встановлюються на спеціальних опорах; каналні, які встановлюються безпосередньо в повітропроводі; дахові, які розміщуються безпосередньо на даху [2].

На рис.1.2 показано аеродинамічні характеристики ВЦ 4-75 №6,3.

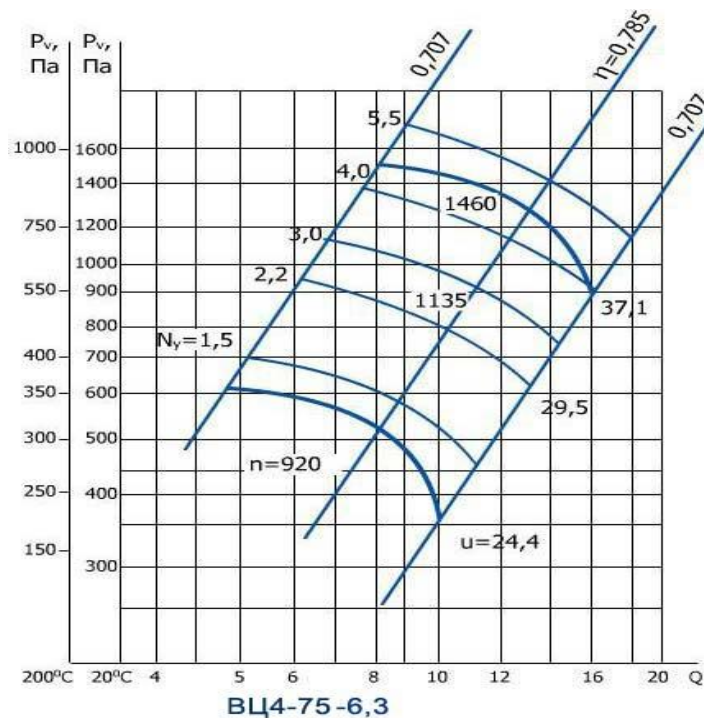


Рисунок 1.2 - Аеродинамічні характеристики ВЦ 4-75 №6,3

1.4 Режими роботи вентилятора в мережі

Розглянемо теоретичні аспекти роботи вентилятора в мережі. Відомо, що при заданій витраті повітря вентилятор повинен створювати повний тиск, який забезпечуватиме подолання втрат з боку нагнітальної та всмоктувальної сторони, а сума втрат тиску на обох ділянках являє собою всі аеродинамічні втрати.

На рис. 1.3 схематично зображено епюри тисків у мережі і положення робочих точок на характеристиці вентилятора. Так, при роботі вентилятора в

режимі рециркуляції, він долає втрати, пов'язані з виходом повітря в атмосферу з певною швидкістю. У цьому випадку мережею є динамічний тиск вентилятора.

У даному режимі він створює максимальну продуктивність, а робочою є точка 1 перетину характеристик мережі та вентилятора. При роботі мережі на всмоктуванні (рис. 1.3, а), опір мережі збільшується, і робочою точкою буде точка 2.

У третьому випадку, при комбінованій схемі (рис. 1.3, с), опір мережі буде складатися з опору елементів як на всмоктувальній, так і на напірній ділянці.

У цьому випадку робочою точкою є точка 3 [3].

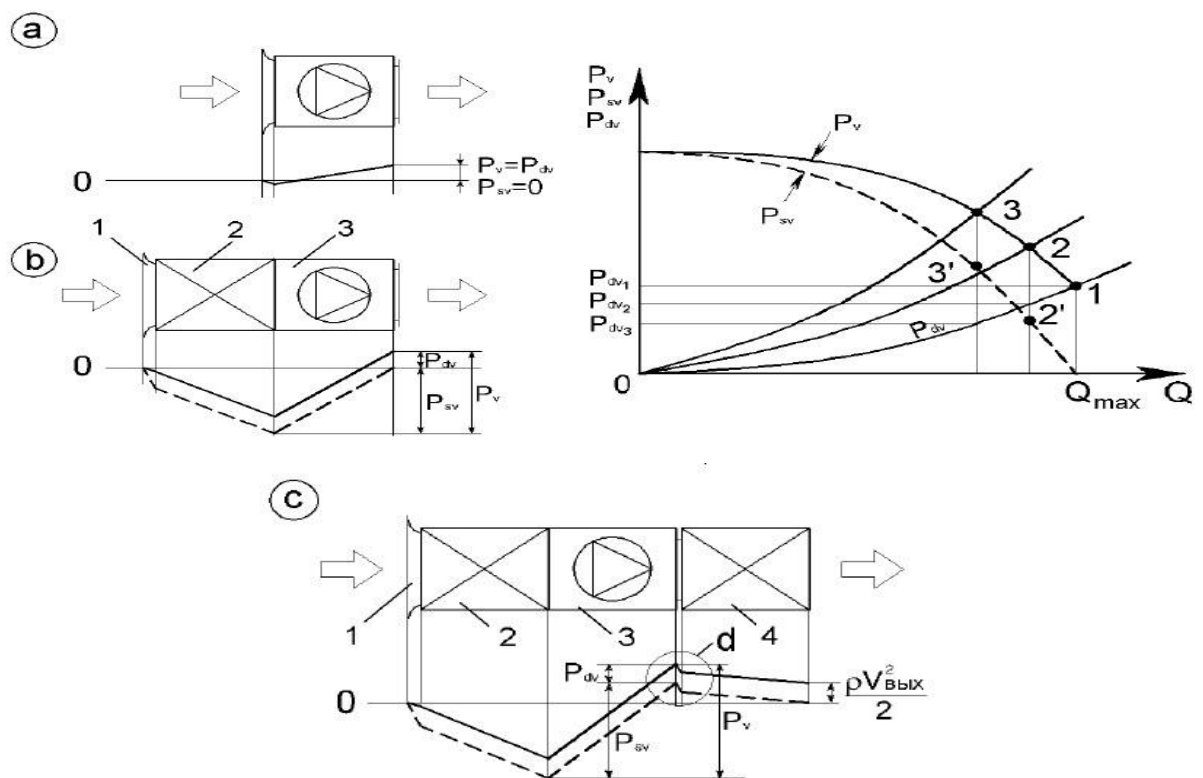


Рисунок 1.3 - Робота вентилятора в мережі: а – режим рециркуляції; б – опір мережі на всмоктувальній лінії; с – опір мережі на обох лініях

1.5 Шляхи зниження електроспоживання вентиляційними установками

Означено напрямки підвищення рівня енергоефективності вентиляційних установок (рис.1.4).

Перший напрямок полягає в економії електроенергії вентиляційними установками за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу.

Для цього потрібно вжити такі заходи: контроль стану технологічної установки; узгодження режиму роботи вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі; підвищення ККД вентиляційної мережі; збільшення експлуатаційного ККД вентиляційних установок; регулювання продуктивності установки зміною частоти обертання робочого колеса; регулювання режимів пуску; організаційні заходи.

Робоча точка вентилятора визначається як точка перетину напірної характеристики вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі. Вона повинна лежати на стійкій частині характеристики вентилятора і бути по можливості ближче до точки, що відповідає максимальному ККД вентилятора. Якщо має місце неефективна робота вентилятора, то робочу точку можна перемістити в зону економічної роботи як за допомогою зміни робочих параметрів вентилятора, так і зміною характеристики вентиляційної мережі.

АД зі змінним опором у колі ротора і двигуни постійного струму незалежного збудження з регульованим реостатом ШПУ керуються зі збільшенням втрат. Якщо за сукупністю вимог для керування механізмом доцільно використовувати регульований електропривод, то реалізація режимів пуску дозволяє знизити втрати енергії в перехідних режимах у кілька разів у порівнянні з некерованими перехідними процесами.

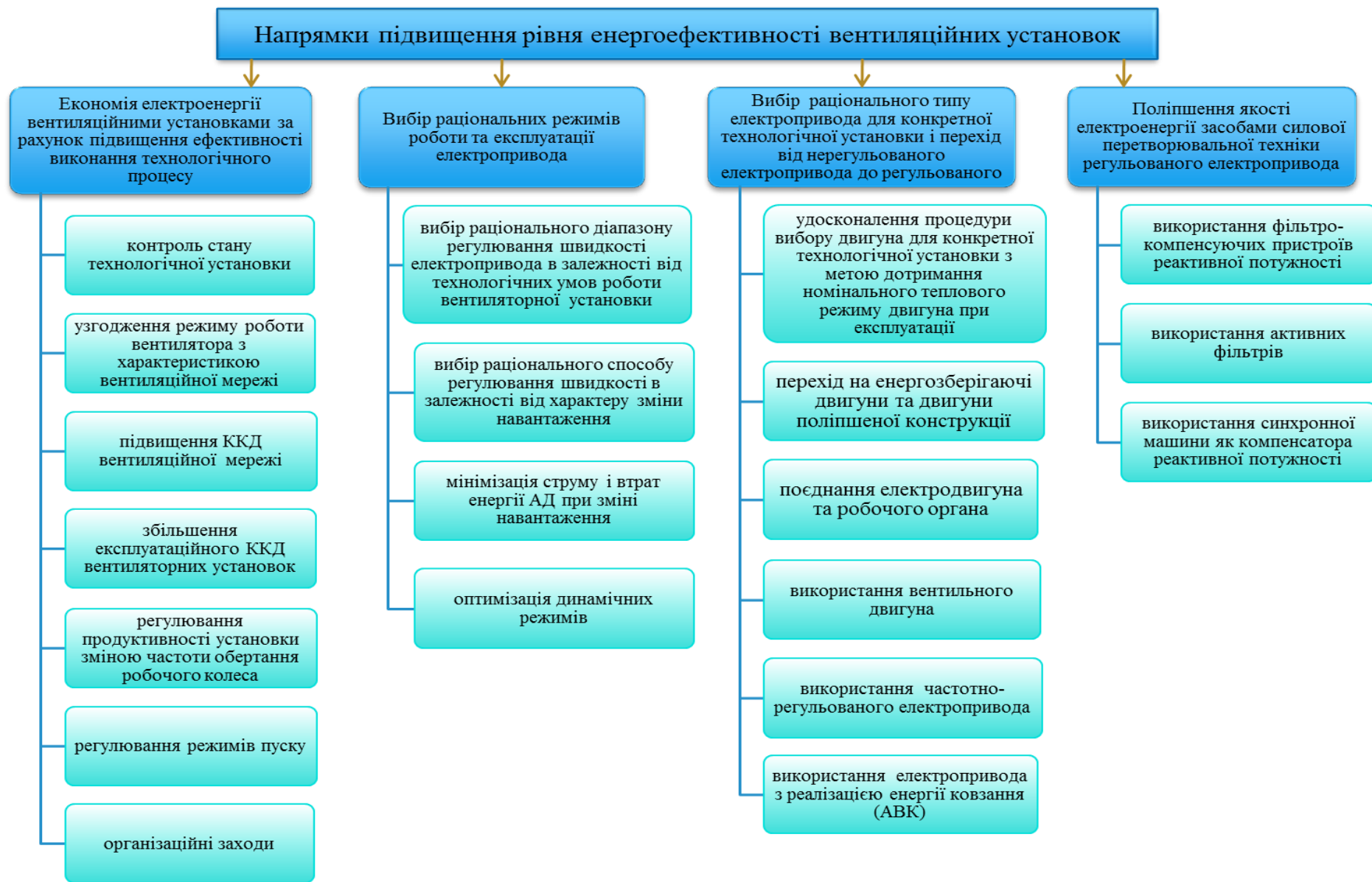


Рисунок 1.4 - Напрямки підвищення рівня енергоефективності вентиляційних установок

Другий напрямок полягає у виборі раціональних режимів роботи й експлуатації електропривода. Сюди входять: вибір раціонального діапазону регулювання швидкості електропривода в залежності від технологічних умов роботи вентиляторних установок; вибір раціонального способу регулювання швидкості в залежності від характеру зміни навантаження; мінімізація струму і втрат енергії АД при зміні навантаження; оптимізація динамічних режимів.

Необхідність дослідження технологічного режиму робочої машини є основою для можливого комплексу заходів, що забезпечують ефективність енергозбереження. Необхідно враховувати, що в умовах істотного зниження продуктивності агрегатів, відсутності можливості використання регульованого електропривода резервом економії електроенергії є періодичні відімкнення енергоємних споживачів.

За неповного навантаження робота з постійною швидкістю характеризується підвищеною питомою витратою електроенергії в порівнянні з номінальним режимом. Зниження швидкості механізмів з недовантаженням дозволяє виконати необхідну роботу з меншою питомою витратою електроенергії. У цьому випадку економічний ефект з'являється також за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Ефект у сфері технології часто виявляється істотно вищим, ніж за рахунок економії електроенергії.

Третій напрямок полягає у виборі раціонального типу електропривода для вентиляційної установки і переході від нерегульованого електропривода до регульованого.

Сюди входять: удосконалення процедури вибору двигуна для конкретної технологічної установки з метою дотримання номінального теплового режиму двигуна при експлуатації; перехід на енергозберігаючі двигуни та двигуни поліпшеної конструкції; поєднання електродвигуна та робочого органа;

використання вентильного двигуна; використання частотно-регульованого електропривода; використання електропривода з реалізацією енергії ковзання (АВК).

Удосконалювання технологічних процесів безпосередньо пов'язано із застосуванням регульованого електропривода. Це сприяє вирішенню завдань забезпечення оптимальних режимів роботи механізмів, зростання продуктивності праці, підвищення ефективності використання енергії, надійності й строку служби устаткування.

При переході від нерегульованого електропривода до регульованого слід ураховувати, що:

економія енергії часто досягається не за рахунок власне привода, а за рахунок того процесу, що обслуговує привод. При цьому економія може в багато разів перевищувати власне споживання електропривода;

для одержання корисного енергетичного ефекту часто необхідне регулювання в невеликих межах при обмежених вимогах до якості регулювання.

Двигун заниженої потужності швидко виходить з ладу, а двигун завищеної потужності перетворює енергію неефективно, тобто з високими питомими втратами в самому двигуні (низький ККД) і в мережі живлення (низький $\cos\phi$). Розв'язання задачі не завжди елементарне, часті помилки, а оскільки найпростіших електроприводів мільйони, то можливі великі збитки. У випадках, коли навантаження незмінне, помилки викликані лише низькою кваліфікацією проектувальників. Коли навантаження змінюється, вибір виявляється значно складнішим, що додатково ускладнюється недостатністю вихідної інформації, паспортних і каталожних даних.

В енергозберігаючих двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищені номінальні значення ККД і $\cos\phi$. Енергозберігаючі двигуни дають ефект при постійному навантаженні. Доцільність застосування енергозберігаючих двигунів повинна оцінюватися з урахуванням додаткових витрат, оскільки невелике (до 5%) підвищення

номінальних ККД і $\cos \varphi$ досягається за рахунок збільшення маси заліза на 30-35%, міді на 20-25%, алюмінію на 10-15% і в цілому двигуна на 25-30% відносно звичайних двигунів.

В енергозберігаючих двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищено номінальні значення ККД і $\cos \varphi$. Енергозберігаючі двигуни дають ефект за постійного навантаження. Доцільність застосування енергозберігаючих двигунів повинна оцінюватися з урахуванням додаткових витрат, оскільки невелике (до 5%) підвищення номінальних ККД і $\cos \varphi$ досягається за рахунок збільшення маси заліза на 30-35%, міді на 20-25%, алюмінію на 10-15% і в цілому двигуна на 25-30% відносно звичайних машин.

Залежності ККД і $\cos \varphi$ від номінальної потужності для звичайних і енергозберігаючих двигунів наведено на рис. 1.5.

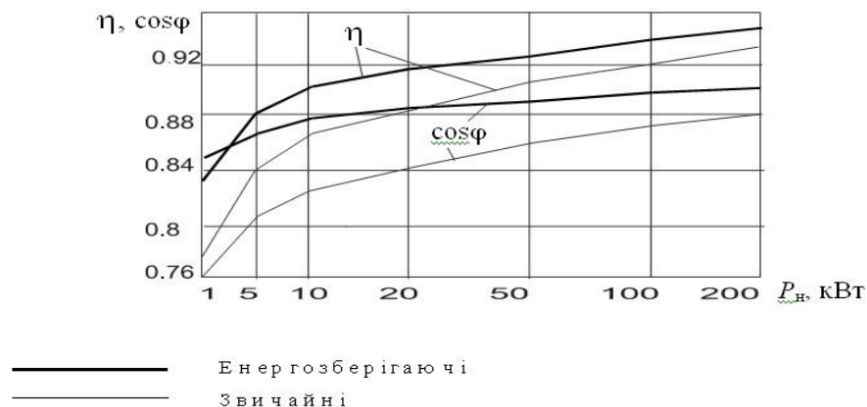


Рисунок 1.5 - Залежності ККД і $\cos \varphi$ від номінальної потужності для звичайних і енергозберігаючих двигунів

Підвищення ККД енергозберігаючих електродвигунів досягається шляхом таких змін в конструкції:

подовжуються сердечники, що складаються з окремих пластин електротехнічної сталі з малими втратами. Такі сердечники зменшують магнітну індукцію, тобто втрати в сталі;

зменшуються втрати в міді за рахунок максимального використання

пазів і провідників більшого перерізу в статорі та роторі;

додаткові опори зводяться до мінімуму за рахунок ретельного вибору числа та геометрії зубців і пазів.

При поєднанні електродвигуна і робочого органа ККД збільшується на 5%.

До складу узагальненої схеми електропривода входять – перетворювач, двигун, муфта, вентилятор (рис. 1.6).

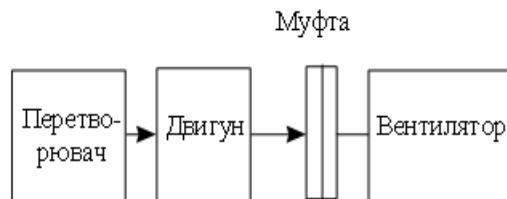


Рисунок 1.6 - Узагальнена схема електропривода

Орієнтовні значення ККД елементів привода складають: перетворювач - $\eta_{\text{п}} = 0,5 \div 0,95$ (менші значення - для малих швидкостей обертання, великі - для більш високих швидкостей); двигун - $\eta_{\text{д}} = 0,75 \div 0,95$ (менші значення для мікромашин, більші – для машин підвищеної потужності); муфта - $\eta_{\text{м}} \approx 0,99$; вентилятор - $\eta_{\text{вент}} \approx 0,95$

Коефіцієнт корисної дії системи електропривода

$$\eta = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{вент}}, \quad (1.1)$$

Підстановка у формулу (1.3) усереднених значень ККД для привода з електродвигуном потужністю 6-10 кВт дає значення ККД у діапазоні $\eta = 0,65 - 0,75$. У середньому п'ять відсотків потужності втрачається в механічних передачах. Таким чином, усунення механічних передач призводить до істотного підвищення ККД системи (на 5%), що є однією з основних тенденцій розвитку електропривода, а в перспективі – поєднання електродвигуна і робочого органа.

Розрахунки показують, що регульований привод дозволяє значно скоротити витрату споживаної електроенергії (до 40%). Більше половини цього заощаджується за рахунок скорочення споживання в неробочі дні, коли продуктивність вентилятора може бути зменшена до 50% від граничного значення.

Для вентиляційних установок не потрібні широкий діапазон регулювання швидкості обертання, то використання двигунів змінного струму є більше економічним, тому що у вузькому діапазоні регулювання частоти обертання не вдається реалізувати можливості приводу постійного струму.

Найбільш перспективним і універсальним є вентиляційний двигун, у якому регулювання швидкості й моменту обертання здійснюється напругою, яка підводиться, струмом зрушення і кутом випередження вмикання вентилів при самокеруванні по частоті живлення. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму[1,4,5,6].

Четвертий напрямок полягає в поліпшенні якості електроенергії засобами силової перетворювальної техніки регульованого електропривода.

Сюди входять: використання фільтро-компенсуючих пристроїв реактивної потужності; використання активних фільтрів; використання синхронної машини як компенсатора реактивної потужності.

Регульований електропривод при роботі впливає на мережу електропостачання, що виражається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювача, коливаннях напруги в мережі і спотворенні синусоїдальної форми напруги.

Зниження коефіцієнта потужності збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат напруги й енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів.

Несинусоїдальність напруги і струму обумовлює додаткові втрати і нагрівання, а також прискорене старіння ізоляції електродвигунів, трансформаторів і, крім того, негативно позначається на функціонуванні різних видів електроустаткування. Специфічний вплив на різні види

електроустаткування, системи релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку виявляється диференційованим і залежить від амплітудного спектру напруги (струму), параметрів електричних мереж та інших факторів.

Ці обставини обумовили широке застосування коефіцієнта несинусоїдальності напруги, %

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^l U_n^2}}{U_{\text{н}}} 100, \quad (1.2)$$

де U_n і $U_{\text{н}}$ — напруга n -ї гармоніки і номінальна напруга мережі.

Відповідно до ГОСТ 13109-97 припустиме значення $k_{\text{нс}}$ обмежується 5%.

За останні роки в промислово розвинених країнах запроваджені стандарти з жорсткими вимогами до якості електроенергії. Так, у Швеції для мереж 0,25...0,43 кВ припустимі значення KU відповідають 4%, для мереж 3,3...24 кВ – 3%, 36...72 кВ – 2%, вище 84 кВ – 1%. У Японії для мереж 1...66 кВ і більше – відповідно 2 і 1%. У Європейському стандарті EN 50.006 припустимі значення гармонік напруги задаються на затискачах еталонних опорів, що рівносильне нормуванню гармонік струму. У публікації 555-2 МЕК передбачене також обмеження гармонік струму, створюваних побутовими електроприладами в низьковольтній системі електропостачання.

Обмеження гармонік струму, генерованих окремими нелінійними навантаженнями чи проникаючих з розподільних мереж у мережі енергосистеми, у найбільшій мірі сприяє зменшенню впливу гармонійних перешкод на інші електроприймачі й електричні мережі. Так, у Франції і ФРН ці струми обмежуються 5% діючого значення усіх вищих гармонік струму, генерованого нелінійними навантаженнями чи цеху підприємства. У публікації 555-2 МЕК передбачене обмеження гармонік струму, створюваних побутовими електроприладами в низьковольтній системі електропостачання.

Створення й освоєння промисловістю високоефективних силових електронних приладів типу IGBT, GTO та ін. дозволило істотно розширити

функції силових електронних пристроїв, використовуваних для регулювання якості електроенергії.

Традиційно для регулювання якості електроенергії використовувалися компенсатори реактивної потужності та активні фільтри. Нова елементна база силовой електроніки дозволяє створювати перетворювачі змінного/постійного струму, що працюють у 4-х квадрантах комплексної площини на стороні змінного струму з імпульсною модуляцією на підвищених частотах (цей термін відповідає новому стандарту МЭК 60030551). Це дозволяє керувати потоками електроенергії в будь-якому напрямку за необхідним законом[5].

Висновки до розділу 1:

1. Означено основні напрямки енергозбереження для вентиляторних установок:

економія електроенергії вентиляторними установками за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу;

вибір раціональних режимів роботи й експлуатації електропривода;

вибір раціонального типу електропривода для вентиляторної установки і перехід від нерегульованого електропривода до регульованого;

поліпшення якості електроенергії засобами силовой перетворювальної техніки регульованого електропривода.

2. Встановлено, що найвищі ККД і $\cos\phi$ будуть досягнені при виборі раціонального типу електропривода для вентиляторної установки і переході від нерегульованого електропривода до регульованого

поліпшення якості електроенергії засобами силовой перетворювальної техніки регульованого електропривода.

3. Визначено, що найбільш перспективним і універсальним є вентильний двигун.

2 РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОБ'ЄКТАХ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

2.1 Загальні положення

Споживачі електроенергії торгово-розважального центру (привод, вентилятори, кондиціонери, холодильні установки, насоси) являють собою нелінійне навантаження для мережі живлення змінного струму і є джерелом реактивної потужності, а також генерують в мережу гармоніки кратні частоті мережі і несучій частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертора. Зниження коефіцієнта потужності електропривода збільшує реактивну потужність в електропостачальній системі (ЕПС), що призводить до додаткових втрат напруги й енергії в ній і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. Підвищення рівня електромагнітних перешкод у мережі призводить до збою в роботі інших електронних систем, що працюють у безпосередній близькості від перетворювача частоти та мають спільні з ним шини змінного струму.

Як відомо, показниками несинусоїдальності напруги є коефіцієнт викривлення синусоїди напруги

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^l U_{(n)}^2}}{U_H} 100, \% , \quad (2.1)$$

та коефіцієнт кратності вищих гармонік (ВГ) (рівень гармонік)

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_H} 100, \% , \quad (2.2)$$

де $U_{(n)}$ і U_H — напруга n -ї гармоніки і номінальна напруга мережі.

Відповідно до ГОСТ 13109-97 допустиме значення K_U обмежується 5% з

інтегральною ймовірністю 95% за час вимірювання, зазначений у стандарті. Номер останньої з гармонік, що враховуються, не наведений.

За останні роки в промисловорозвинених країнах запроваджені стандарти з жорсткими вимогами до якості електроенергії [5]. Так, у Швеції для мереж 0,25...0,43 кВ припустимі значення K_U відповідають 4%, для мереж 3,3...24 кВ – 3%, 36...72 кВ – 2%, вище 84 кВ – 1%. У Японії для мереж 1...66 кВ і більше – відповідно 2 і 1%.

На даний час застосовують такі методи забезпечення якості електроенергії:

- зниження рівнів вищих гармонік (ВГ) засобами мережі живлення;
- застосування багатофункціональних пристроїв;
- використання спеціальних способів керування і схемних рішень вентильних перетворювачів регульованого електропривода;
- використання традиційних засобів компенсації реактивної потужності (КРП) (синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів).

На рис. 2.1 показана класифікаційна схема компенсаторів реактивної потужності.



Рисунок 2.1 – Класифікаційна схема компенсаторів реактивної потужності

2.2 Зниження рівнів вищих гармонік засобами мережі живлення

Зниження рівнів ВГ засобами мережі живлення досягається раціональною побудовою ЕПС, при якому забезпечується припустимий рівень ВГ напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є застосування трансформаторів з підвищеною первинною напругою 110...220 (330) кВ; живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів чи підімкнення їх до окремих обмоток триобмоточних трансформаторів або окремих обмоток двообмоточних трансформаторів з розщепленою вторинною обмоткою; підімкнення паралельно нелінійним навантаженням синхронних двигунів. Застосування в перетворювальних агрегатах трансформаторів з первинною напругою 110...220 кВ виключає вплив різкозмінних навантажень на споживачі розподільних мереж 0,38...10 кВ. Перешкодою до використання таких засобів може бути поява неприпустимих напруг 11, 13-ї гармонік (меншою мірою- 17, 19-ї) в мережах енергосистеми живлення.

Прикладом багатофункціональних пристроїв є так звані фільтрокомпенсуючі та фільтросиметруючі пристрої. Перші, поряд зі зниженням рівня ВГ, генерують у електричну мережу реактивну потужність. Другі можуть використовуватися також для симетрування системи нелінійних напруг в електричній мережі. Резонансні фільтри можуть використовуватися для поділу лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) чи для шунтування (поглинання) струмів вищих гармонік.

Поділ лінійних і нелінійних навантажень може здійснюватися за допомогою фільтрів низьких частот чи смугових фільтрів. Останні більш складні, ніж низькочастотні. Найпростішим фільтром низької частоти є Г-подібний фільтр, контур якого утворюється індуктивністю трансформатора перетворювача і ємністю батареї конденсаторів, підключеної до шин підстанції. Щоб уникнути резонансних підвищень напруги на частотах ВГ, резонансна частота контуру мережа - батарея конденсаторів повинна бути меншою частоти найменшої ВГ амплітудного спектра струму нелінійного навантаження. Однак

для ефективного зниження рівнів ВГ за допомогою Г-подібного фільтра потрібна потужність батареї конденсаторів того ж порядку, що і потужність трансформатора живлення.

2.3 Активні фільтри

Зниження розмахів коливань напруги в ЕПС може здійснюватися за допомогою високошвидкісних пристроїв КРП. Статичні тиристорні компенсатори (СТК) чи активні фільтри (АФ) будуються з використанням компенсаційних перетворювачів, що мають штучну комутацію вентилів. Такий перетворювач має на стороні випрямленого струму реактор (індуктивний акумулятор енергії) чи батарею конденсаторів (ємнісний акумулятор енергії). Поєднання перетворювача з реактивним елементом дозволяє створити пристрій для регулювання реактивної потужності в ЕПС.

На рис. 2.2 показано основні типи активних фільтрів. АФ може підключатися паралельно чи послідовно нелінійному споживачу. На цьому рисунку позначено: U_c – напруга мережі; I_1, I_{nc} – відповідно струми першої та n -ї гармонік мережі; U_{c1}, U_{cn} – відповідно напруги першої та n -ї гармонік мережі; U_{af}, I_{af}, Z_R – відповідно напруга, струм та внутрішній опір активного фільтра; Z_n – внутрішній опір нелінійного навантаження; I_{nn}, U_{xn} – відповідно струм та напруга n -х гармонік нелінійного навантаження.

Для мінімізації реактивної потужності всіх гармонік струму, включаючи основну, перетворювач працює в режимі генератора антигармонік, що виключає чи обмежує їх надходження в електричну мережу ЕПС. Таким чином, відбувається захист мережі від негативного впливу потужності ВГ, а також поліпшення коефіцієнта потужності основної гармоніки. Крім того, при необхідності може здійснюватися і регулювання потоку не лише реактивної, але й активної потужності. В такому режимі перетворювач працює з імпульсною модуляцією параметра струму, що дозволяє регулювати потоки активної і реактивної потужності в мережі в залежності від її завантаження споживачами,

одночасно обмежуючи рівень ВГ струму.

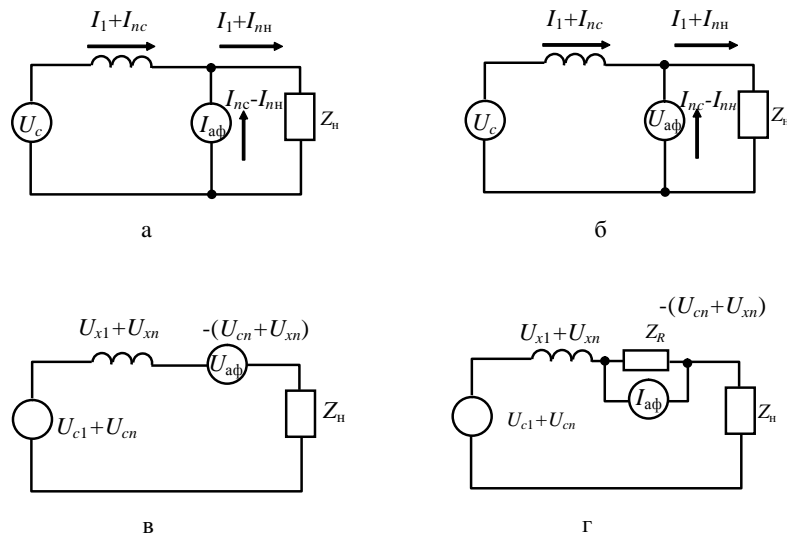


Рисунок 2.2 - Основні типи активних фільтрів: а – паралельне джерело струму; б – паралельне джерело напруги; в - послідовне джерело напруги; г - послідовне джерело струму

Як стабілізатор напруги з АФ може бути використана схема, зображена на рис. 2.3.

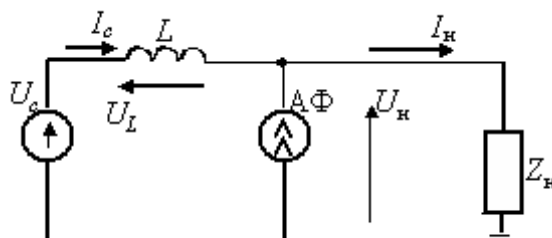


Рисунок 2.3 - Схема стабілізатора напруги з АФ

У цій схемі АФ компенсує ВГ струму нелінійного навантаження Z_n . Стабілізація ж напруги U_n здійснюється за рахунок регулювання реактивної потужності основної гармоніки. При незначних відхиленнях напруги від заданого значення (5 %) вхідний коефіцієнт потужності по основній гармоніці залишиться близьким до $\cos\varphi = 1$ за рахунок повної КРП навантаження.

У випадку ж незначного зниження вхідної напруги чи її підвищення коефіцієнт потужності зменшується з одночасною зміною характеру потужності. При зниженні напруги вона має ємнісний характер, а при підвищенні – індуктивний. Слід зазначити, що наявність вхідного реактора L підвищує захищеність схеми від різких сплесків і провалів напруги. Наявність же ємнісного акумулятора в АФ дозволяє забезпечити захист споживача протягом короточасних відхилень напруги від норми. Очевидно, що ефективність такого захисту визначається значенням ємності чи інших акумуляторів енергії на стороні постійного струму. Основним недоліком АФ є відносно велика встановлена потужність перетворювачів, що входять до їх складу. Практично вона розраховується на потужність нелінійного споживача.

Більш перспективними є гібридні фільтри, що поєднують переваги традиційних пасивних фільтрів з реактивних елементів і активних фільтрів відносно невеликої потужності. Відомо, що зміна реального частотного спектру ВГ струму чи напруги в мережі має стохастичний характер. Крім того, на параметри фільтрів впливають технологічні допуски і процеси старіння їх елементів. У результаті практично виключається їх налаштування на строго фіксовані частоти. З іншого боку, точність налаштування і висока добротність фільтрів, як правило, впливають на перехідні процеси, викликаючи, наприклад, перенапруги в мережі. Це може призвести до виникнення явища «антирезонансу» на частотах, близьких до резонансної (рис. 2.4).

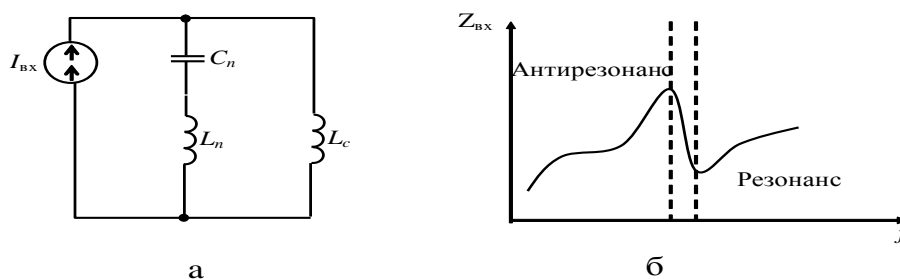


Рисунок 2.4 - Явище антирезонансу: а - принципова схема; б – частотна залежність вхідного повного опору

Використання АФ як регульованого імпедансу дозволяє виключити

антирезонансні явища і поліпшити якість перехідних процесів при комутації навантаження. При цьому встановлена потужність перетворювача активного фільтра може бути знижена до 10 % і менше від потужності джерела гармонік струму. Наприклад, при коефіцієнті викривлення синусоїди струму навантаження 35,9 % застосування двох пасивних LC – кіл і широкосмугового RLC - фільтра знижує цей коефіцієнт до 28 %, а при додаванні двох малопотужних коригувальних перетворювачів - до 3,9 %.

Для керування параметрами фільтра до його пасивних елементів підключаються активні (рис. 2.5).

Створення й освоєння високоефективних силових електронних приладів типу IGBT, IGCT та ін.[5,7] дозволило істотно розширити функції силових електронних пристроїв, використовуваних для регулювання якості електроенергії. Нова елементна база силової електроніки дозволяє створювати перетворювачі змінного/постійного струму, що працюють у 4-х квадрантах комплексної площини на стороні змінного струму з імпульсною модуляцією на підвищених частотах (цей термін відповідає новому стандарту МЭК 60030551). Це дозволяє керувати потоками електроенергії в будь-якому напрямку по заданому закону.

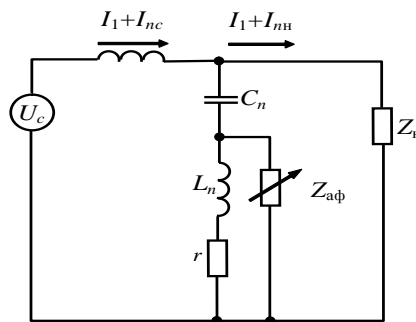


Рисунок 2.5 - Схема фільтра з пасивними і активними елементами

На рис. 2.6 зображено принцип роботи чотириквadrантного перетворювача (напруга має синусоїдальну форму, а струм – трапецієподібну, при цьому фазовий зсув відповідає квадранту площини на векторній діаграмі).

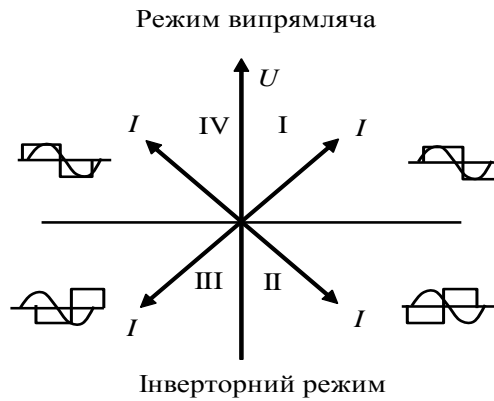


Рисунок 2.6 - Принцип роботи чотириквadrантного перетворювача

На рис. 2.7 наведена схема СТК з використанням біполярних транзисторів з ізолюваним затвором IGBT[8].

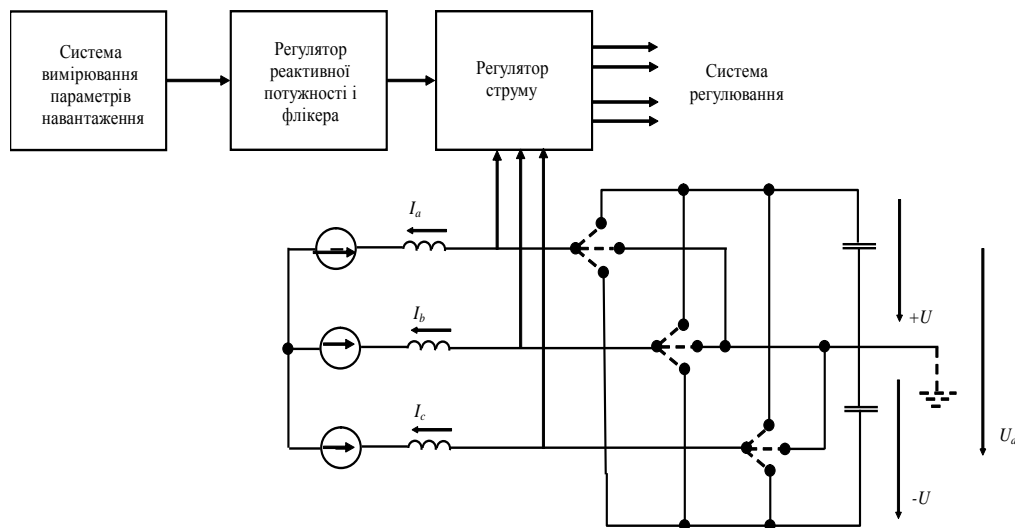


Рисунок 2.7 - Схема статичного тиристорного компенсатора

У схемі транзистори працюють на частоті 15кГц у режимі перемикачів трьох рівнів напруги, що на стороні постійного струму відповідає $+U$, 0 , $-U$. Оскільки перемикання здійснюються з великою частотою відповідно до визначеного алгоритму, то на стороні змінного струму формується практично синусоїдальна міжфазна напруга.

У порівнянні зі стандартною технологією (рис. 2.8) нові СТК працюють щонайменше в два-три рази ефективніше.

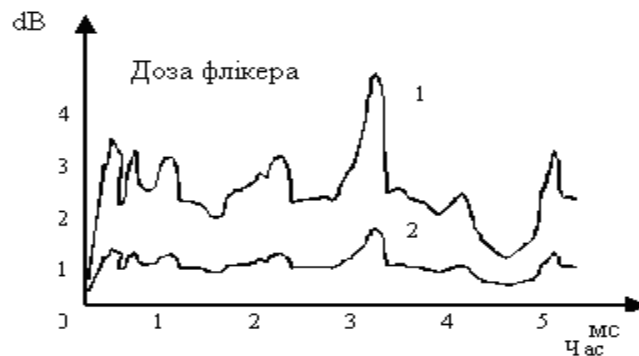


Рисунок 2.8- Криві залежності дози флікера від часу: 1 – стандартна технологія; 2 – нові СТК

На даний час з'явилася тенденція розширення функцій пристроїв «акумуляторна батарея – перетворювач» (АБП) із метою регулювання якості електроенергії в електричній мережі[4]. При цьому структура пристрою типу «on-line» дозволяє стабілізувати параметри напруги, яка живить споживачі. Однак такий пристрій рідко використовується, оскільки має відносно високу вартість. Структура пристрою складається, як мінімум, із двох перетворювальних ланок, кожна з яких розрахована на повну потужність споживача.

Для того, щоб виключити часте підключення інвертора до батареї при низькій якості напруги мережі, використовують структури з додатковим стабілізатором напруги мережі, що забезпечує необхідний рівень напруги на навантаженні при відносно невеликих відхиленнях напруги: +10...-15%. Наприклад, схема з вольтододавальним трансформатором і перемиканням обмоток. Для більш точного регулювання послідовно з ним ввімкнено реактор малої індуктивності. Також може використовуватися малопотужний інвертор з підключенням обмоток вихідного трансформатора послідовно з навантаженням для регулювання напруги у вузькому діапазоні. При цьому основний

перетворювач пристрою працює в режимі АФ. Малопотужний інвертор використовується також для підзарядки акумуляторної батареї.

Структуру АБП із такими функціями прийнято називати інтерактивною стосовно електричної мережі, тобто такою, що знаходиться у визначеній взаємодії з мережею. Напруга мережі змінного струму не перетворюється в постійний струм, а живлення навантаження здійснюється безпосередньо від цієї мережі через трансформатор чи реактор. При цьому регулювання напруги здійснюється за допомогою використання інвертора на ключових елементах у поєднанні з такими пасивними компонентами, як реактори, лінійні чи ферорезонансні трансформатори. Термін «інтерактивний АБП» означає, що його інвертор забезпечує підвищення і зниження напруги електричної мережі чи її заміщення (у разі провалу напруги).

У деяких нових структурах перетворювач при наявності мережі працює в режимі АФ, обмежуючи ВГ нелінійного споживача і компенсуючи потужність основної гармоніки (рис. 2.9).

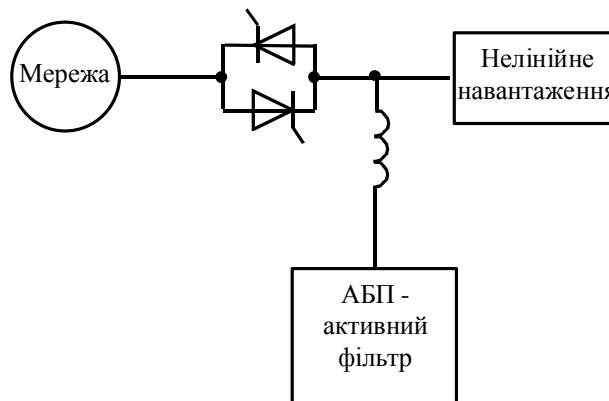


Рисунок 2.9 - Структурна схема пристрою АБП

Виключити генерування ВГ струму і поліпшити коефіцієнт потужності споживача за основною гармонікою можна і на етапі його розробки різними схемотехнічними засобами, наприклад, за рахунок підвищення числа фаз перетворювачів регульованого електропривода. Рядом фірм розроблені коректори потужності, що вбудовуються безпосередньо в нелінійні споживачі. Такий

коректор підключається безпосередньо на стороні постійного струму первинного випрямляча і забезпечує споживання струму, близького за формою до синусоїдального, а також коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 1$ у всіх режимах роботи. З урахуванням масового використання ефект від коректорів потужності може бути значним.

При використанні перетворювачів частоти регульованого електропривода ефективним способом поліпшення електромагнітної сумісності є застосування пасивних фільтруючих пристроїв. Використання *LC*-фільтрів є більш вигідним з технічної й економічної сторони. Припустимий рівень ВГ, генерованих перетворювачем частоти, регламентується відповідними міжнародними стандартами IEC (IEC 1800-3-EMC. Product Standard for Power Drive System), європейськими нормами EN 61800-3, а також рекомендаціями Міжнародного Спеціального Комітету з Перешкод (CISPR). У СНД рівень припустимих перешкод також регламентується стандартом ГОСТ 13661-92.

2.4 Використання традиційних засобів компенсації реактивної потужності (синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів)

Синхронні двигуни є ефективним засобом КРП в ЕПС. Виконуючи свою основну функцію приводного двигуна, вони одночасно можуть генерувати в мережу реактивну потужність, тобто працювати з випереджальним $\cos\varphi$. Це забезпечується відповідним регулюванням їх струму збудження. Однак зміна струму збудження призводить до збільшення габаритної потужності двигуна. Відношення повної (габаритної) потужності S до активної P можна подати рівням

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}. \quad (2.3)$$

Нехай необхідна реактивна випереджальна потужність Q складає 40%

активної потужності, тобто $Q/P = 0,4$. Розрахунок за формулою (3) показує, що при цьому відношення S/P складе 1,08, тобто генерування зазначеної реактивної потужності вимагає збільшення габаритної потужності лише на 8%.

Синхронні компенсатори призначені для компенсації КРП мережі і підтримки номінального рівня напруги в районах зосередження споживчих навантажень. Нормальним є перезбуджений режим роботи синхронного компенсатора, коли він віддає в мережу реактивну потужність. Компенсатори позбавлені приводних двигунів і з погляду режиму своєї роботи, по суті, є синхронними двигунами, що працюють на неробочому ходу. Тому синхронні компенсатори завантажені також невеликим активним струмом і споживають з мережі активну потужність для покриття своїх втрат.

Однак у періоди спаду споживчих навантажень (наприклад, уночі) нерідко виникає необхідність роботи синхронних компенсаторів також у недозбудженому режимі, коли вони споживають з мережі індуктивний струм і реактивну потужність. У цьому випадку напруга мережі прагне зрости, і для підтримки її на номінальному рівні необхідно завантажити мережу індуктивними струмами, що викликають у ній додаткове зниження напруги. Для цього кожен синхронний компенсатор забезпечується автоматичним регулятором збудження, що підтримує напругу на затискачах компенсатора сталою.

Батареї конденсаторів (БК) набули на промислових підприємствах найбільшого поширення як засіб компенсації реактивної потужності. Застосовують два способи включення БК: шунтові БК, які підключаються до шин підстанцій паралельно, і застосовуються для генерації реактивної потужності у вузлах мережі (поперечна компенсація рис.2.10,а); БК, які включають в лінії послідовно для зменшення реактивного опору ліній (подовжня компенсація рис. 2.10, б). БК комплектуються з окремих конденсаторів, сполучених послідовно і паралельно, в однофазному і трифазному виконанні на номінальну напругу 0,22 - 10,5 кВ.

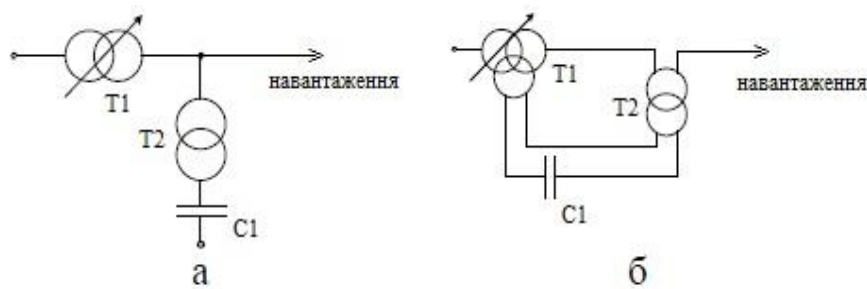


Рисунок 2.10 – Схеми включення БК: а – поперечна компенсація, б – повздовжна компенсація

Перевагами БК є простота в експлуатації зарахунок відсутності обертових частин, простота монтажних робіт, зарахунок малої маси, малі втрати активної потужності. Застосовують БК як регульовані (керовані) так і нерегульовані. У нерегульованих БК число конденсаторів незмінне, а величина реактивної потужності залежить тільки від квадрата напруги. Сумарна потужність нерегульованих БК не повинна перевищувати найменшого реактивного навантаження мережі. Але якщо вибрані компенсуючі пристрої постійно підключені до мережі, незалежно від режиму реактивних навантажень, то в періоди пониження навантажень надмірна реактивна потужність компенсуючих пристроїв, що виробляється, передаватиметься від споживача в енергосистему (перекомпенсація). При цьому струмове навантаження в мережі зростає, збільшуються втрати потужності, напруга в мережі також збільшується і може досягти не припустимих значень. У керованих БК регулювання відбувається зарахунок зміни ступенів БК, тобто збільшення включених секцій БК. При цьому змінюється ємність БК і потужність, що збільшує вироблення реактивної потужності в мережі незалежно від рівня напруги.

Недоліками керованих БК є при збільшенні кількості ступенів збільшуються затрати на пристрої перемикачів та захисту, при підключенні БК чутливі до струмів комутації; регулювання ступенів БК негативно впливає на контактну апаратуру.

2.5 Компенсація реактивної потужності на базі транзисторних перетворювачів

Установки компенсації реактивної потужності на базі транзисторних перетворювачів, рис. 2.11, до свого складу включають КБ ($C1$), реактори ($L1$), транзисторний перетворювач ($VT1$, $VD1$ - $VD4$) та фільтрвищих гармонік (ФВГ). Зміна струму коливального контуру здійснюється широтно-імпульсною модуляцією імпульсів управління транзистором, що у свою чергу викликає пульсації струму, для зниження яких застосовується пасивні LC -фільтри [9].

Перевагами систем з транзисторним перетворювачем є те, що транзистори, на відміну від тиристорів, є повністю керованими елементами, мають більшу швидкодію та менші втрати потужності.

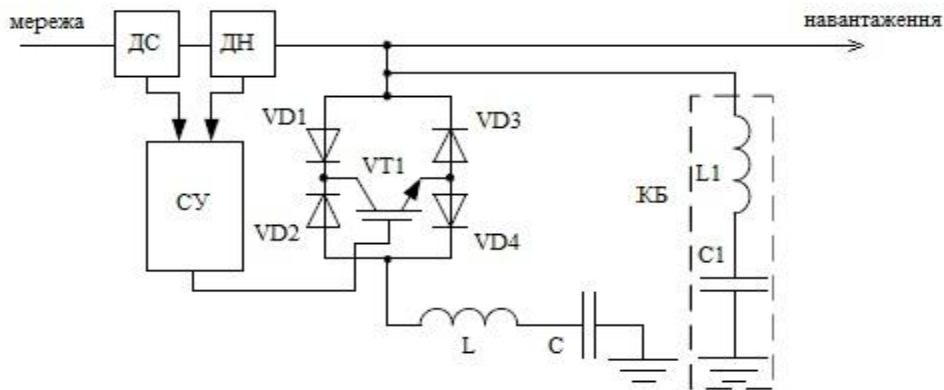


Рисунок 2.11 – Система з транзисторним перетворювачем

Недоліками системи компенсації на базі транзисторних перетворювачів є: можливість виникнення резонансу струму чи напруги в LC -контурі; значні імпульси напруги на транзисторному перетворювачі, суттєвий вплив на форму струму та напруги мережі.

2.6 Регулятори реактивної потужності

Регулювання потужності конденсаторних установок може здійснюватись за наступними параметрами: час доби, напруга, струм навантаження, значенням і напрямом реактивної потужності. Регулювання за часом доби є найбільш простим видом регулювання. Таке регулювання доцільно застосовувати у тих випадках, коли режим реактивного навантаження і напруги в мережах підприємства є достатньо стабільним. Регулювання потужності конденсаторних установок по напрузі доцільно в тих випадках, коли режим напруги визначається в основному тільки режимом реактивних навантажень. В більшості випадків це можливо тоді, коли конденсаторні установки підключаються до мережі, що живиться від нерегульованого трансформатора. Регулювання по струму навантаження доцільно у тому випадку, коли по своєму характеру графіки активних і реактивних навантажень співпадають. Регулювання по величині і напрямку реактивної потужності слід застосовувати тоді, коли характери цих графіків один від одного відрізняються, а видачу реактивної потужності в мережу енергосистеми необхідно обмежити. Для забезпечення регулювання споживання реактивної потужності використовуються регулятори реактивної потужності (РРП).

Функціональна схема підключення РРП, представлена на рис. 2.12, складається з системи управління і комутованих БК. Принцип роботи полягає у тому, що система управління зчитує сигнали з датчиків струму (ДС) і напруги (ДН), після процесу обчислення пристрій управління подає сигнали на вимикачі ($B1...Bn$) і залежно від зміни споживання реактивної потужності регулятор підключає або відключає секції конденсаторних батарей ($C1...Cn$).

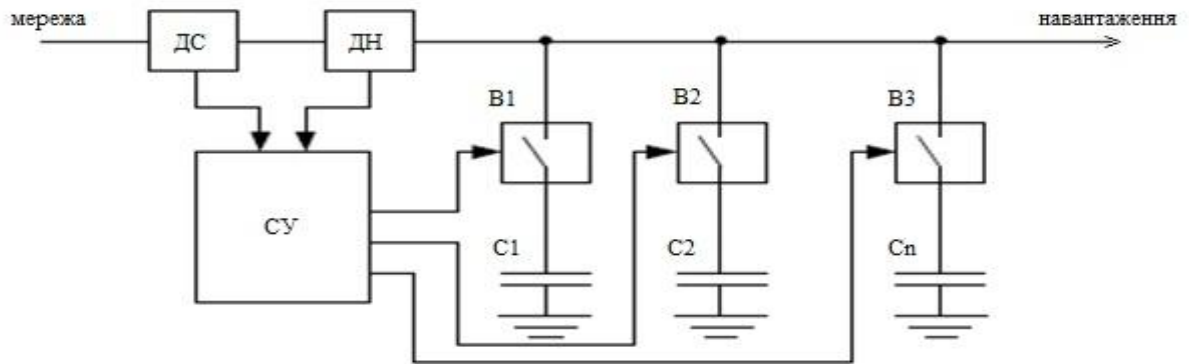


Рисунок 2.12 – Функціональна схема підключення регуляторів реактивної потужності

При застосуванні РРП число секцій регульованої конденсаторної батареї повинне вибиратися залежно від характеру графіка споживання реактивної потужності. У багатьох випадках виявляється достатнім обмежитися трьома-чотирма секціями. При значній нерівномірності графіка електричних навантажень за період доби число секцій може бути збільшене до п'яти-шести. Подальше збільшення числа секцій не рекомендується, оскільки це ускладнює і здорожує установку [10]. Більш ефективним способом управління РРП є використання однієї із секцій менше в два рази. Коли відбувається збільшення споживання реактивної потужності, але менше, ніж на значення однієї секції, система керування підключає секцію у два рази менше і таким чином система керування збільшує свій діапазон регулювання.

До недоліків регуляторів реактивної потужності можна віднести: при застосуванні регулювання за часом доби у системі електропостачання характер навантаження має бути незмінним; значні затрати на комутуючу апаратуру; виникнення імпульсів напруги в моменти комутації; неможливість плавно змінювати споживання реактивної потужності системою управління.

4.7 Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ

Основні параметри DCRK: цифрове програмування; кількість ступенів 5, 7, 8 та 12; 5- або 7-ступенева конфігурація в корпусі 96х96 мм; 8- або 12-ступенева конфігурація в корпусі 144х144 мм; захист від перевантажувального струму конденсаторів; внутрішній захист від перегріву щита керування; інтерфейс програмування TTL/RS232; автоматична настройка; конфігуровані аварійні сигнали.

Схема підключення регулятора DCRK показана на рис. 2.13.

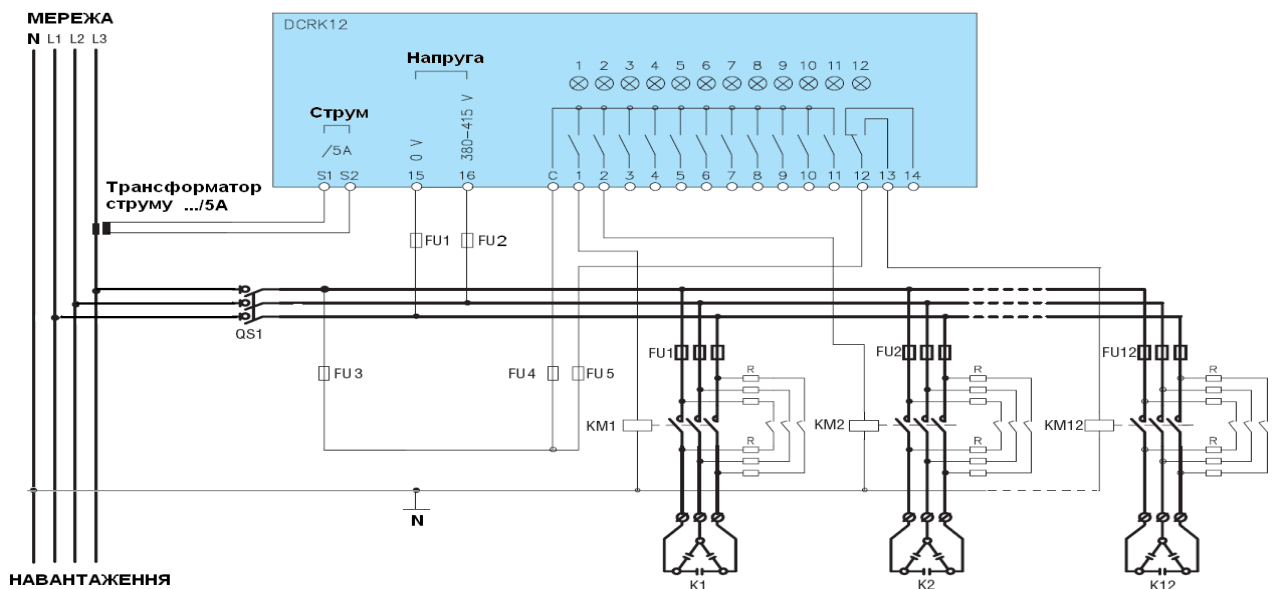


Рисунок 2.13 – Схема підключення регулятора DCRK

Основні параметри DCRJ: цифрове програмування; 8- або 12-ступенева конфігурація в корпусі 144x144 мм; подвійний дисплей; розділений вхід вимірювання напруги; захист від перевантажувального струму конденсаторів; сенсорний контроль температури щита керування; внутрішній та зовнішній захист від перегріву; інтерфейс програмування RS485; автоматична настройка; вимірювання гармонік струму і напруги; журнал станів; конфігуровані аварійні сигнали; можливість роботи в мережі середньої напруги.

Схема підключення регулятора DCRJ показана на рис. 2.14.

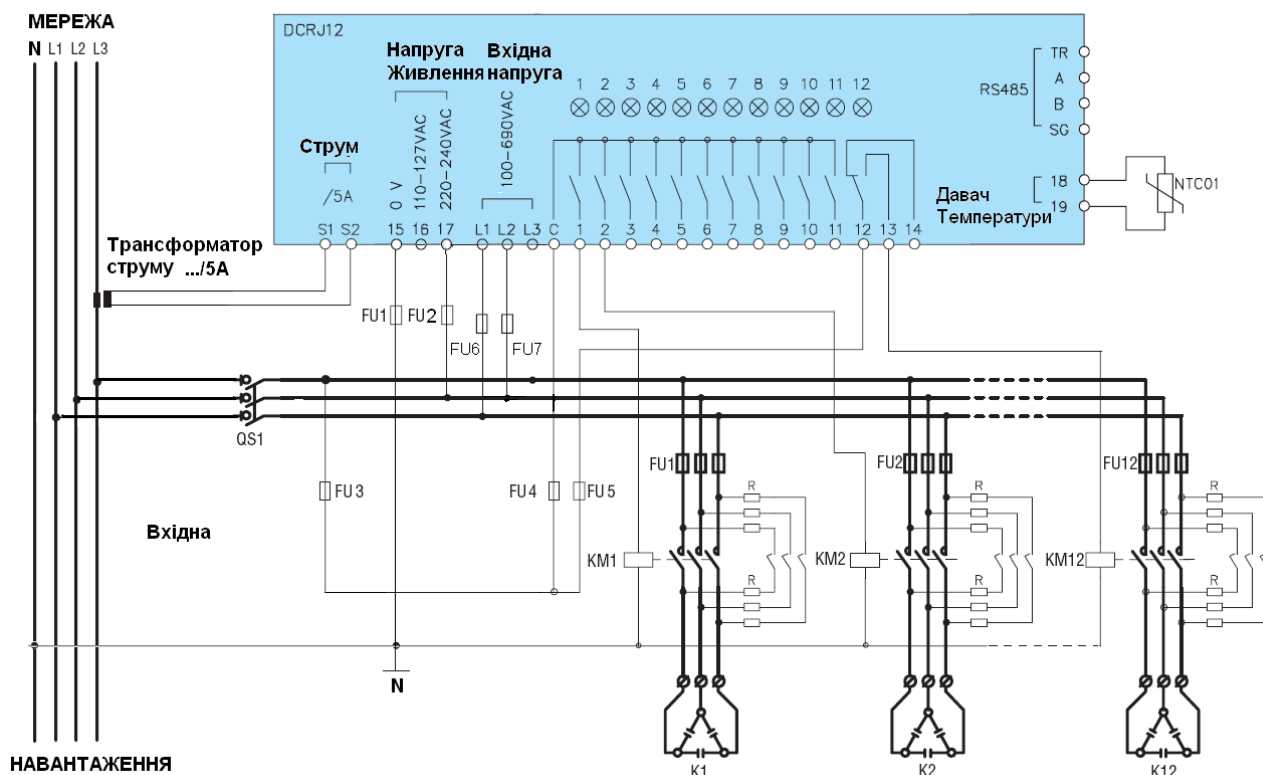


Рисунок 2.14 – Схема підключення регулятора *DCRJ*

Регулятор коефіцієнта потужності **DCRK / DCRJ** — цифровий пристрій, який виконує функції контролю і регулювання реактивної потужності системи і здійснює зчитування показів коефіцієнта потужності з високою точністю, на яку не впливають зміни властивостей електронних компонентів.

Алгоритм контролю забезпечує нормальну роботу приладу навіть в системі, яка характеризується високим коефіцієнтом гармонік. Коефіцієнт потужності системи регулюється групою перемикаючих конденсаторів виходячи з розрахованої реактивної потужності системи своєчасно і точно. Результатом є суттєве зменшення кількості перемикачів і більше ефективне використання конденсаторних батарей.

Регулятор коефіцієнта потужності **DCRK / DCRJ** переваги: внутрішній температурний датчик - відключення установки при перегріванні; розрахунок поточного перевантаження конденсаторів; розрахунок середнього тижневого $\cos(\varphi)$; два додаткових вихідних реле, запрограмовані як тривога і / або витяжний вентилятор.

2.8 Імітаційна модель системи управління компенсатора реактивної потужності і потужності спотворень на базі багаторівневого каскадного інвертора

Звичайні заходи для поліпшення якості напруги (посилення мережі живлення, установка фільтрокомпенсуючих ємнісно-індуктивних елементів) найчастіше виявляються дорогими і неефективними, особливо в галузі високих напруг і великих потужностей. Поява потужних швидкодіючих перетворювачів напруги з повністю керованими вентилями дозволяє реалізувати їх у вузлах з потужними, нелінійними та навантаженнями, які різко змінюються.

Для компенсації реактивної складової потужності пропонується використовувати чотирирівневий компенсатор реактивної потужності та потужності спотворень (рис. 2.15). Використання багаторівневої топології на базі каскадної побудови силового інвертора вигідніше в порівнянні з іншими типами через економічне використання ключових і пасивних елементів, поліпшену форму вихідної напруги інвертора, а також ідентичність їх побудови – однофазних мостових інверторів, що спрощує не лише конструкцію, а й математичний аналіз даного типу компенсатора.[11,12].

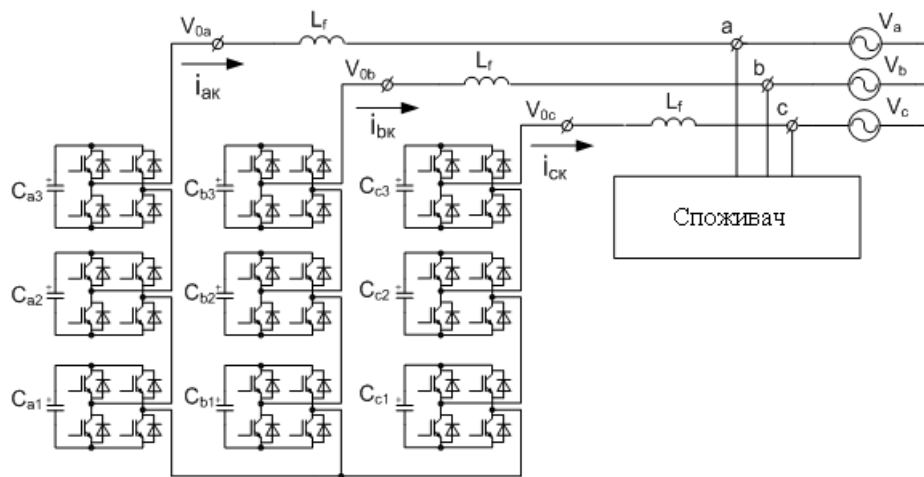


Рисунок 2.15 –Чотирирівневий компенсатор реактивної потужності та потужності спотворень

Принцип компенсації реактивної потужності полягає в перерозподіленні потоку потужності в системі «мережа живлення – ККП - навантаження» таким чином, весь потік реактивної потужності та потужності спотворень циркулює між ККП і навантаженням, не переходячи в мережу живлення. Принцип компенсації потужності спотворень полягає в генеруванні ККП в живильну мережу струму, всі гармоніки якого рівні по амплітуді, але протилежні по фазі вищим гармонікам струму навантаження. На рис. 2.16 представлено структурну схему перерозподілу потужностей [11].

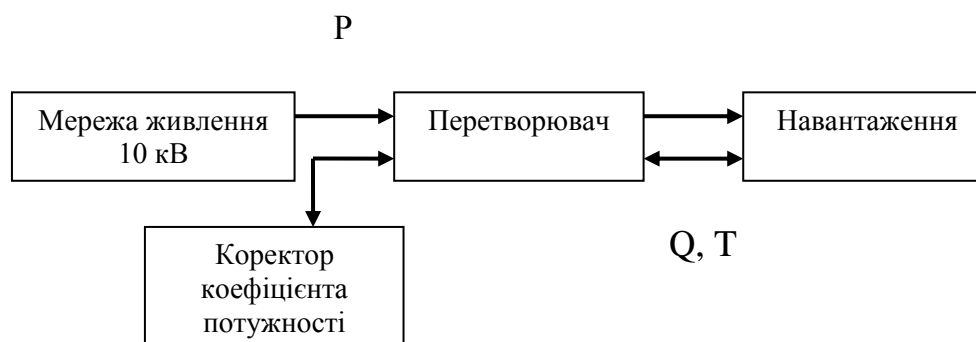


Рисунок 2.16 - Структурна схема перерозподілу потужностей

Математичний аналіз досліджуваної схеми проводився в синхронній системі dq-координат, орієнтованій за вектором напруги мережі живлення. Було

отримано опис компенсатора для усередненої (2.4),(2.5), і малосигнальної (2.6),(2.7) математичних моделей:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s / \omega \cdot L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s / \omega \cdot L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s / \omega \cdot L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dE_m}{dt} = -\frac{3E_m}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} f_{dm} & f_{qm} & f_{0m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} + \frac{3 \cdot e}{\omega L_s} \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \\ F_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s / \omega L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s / \omega L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s / \omega L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$\frac{de_m}{dt} = -\frac{3e_m}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} I_d & I_q & I_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{dj} \\ f_{qj} \\ f_{0j} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} F_{dm} & F_{qm} & F_{0m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де f, i, e, v – відповідно відхилення параметрів скважності ШІМ, струму ККП, напруги на конденсаторах і мережі від точок спокою F, I, E і V відповідно.

Використовуючи математичний опис каскадного багаторівневого коректора коефіцієнта потужності (ККП), можна знайти передавальні характеристики основних параметрів пристрою. Провести аналіз стійкості функціонування системи управління та розрахувати параметри регулювальних ланок можна або за передавальними функціями (2.8) - (2.10). За відомим станом ККП і навантаження (струми і напруги) визначається необхідна вихідна напруга ККП для формування компенсованого струму [12].

$$W_{idd} = W_{iqq} = \frac{NE(R_s + pL_s)}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (2.8)$$

$$W_{iqd} = \frac{-NE\omega L_s}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (2.9)$$

$$W_{Eidm} = -\left(\frac{k_{dm} L_s p + k_{qm} L_s \omega + k_{dm} R_s}{3p^2 C L_s + 3p C R_s + k_{dm} k_{qm} N} \right), \quad (2.10)$$

де N -число інверторів у фазі; E - напруга на конденсаторах; R і L - активний опір та індуктивність фазного реактора; ω - кутова частота мережі; C - ємність конденсатора; k_m - коефіцієнт заповнення ШІМ.

За отриманими передавальними функціями системи управління досліджено стійкість і працездатність компенсатора. Для більш детального і докладного вивчення алгоритмів роботи, способів компенсації, часових та інтегральних характеристик розроблено математичну й імітаційну моделі багаторівневого інвертора в середовищі Matlab / Simulink.

Імітаційна модель чотирирівневого коректора коефіцієнта потужності показана на рис. 2.17.

Імітаційна модель «мережа – ККП - навантаження» реалізована в пакеті Matlab/Simulink. В якості моделі джерела напруги та силових модулів використовуються стандартні бібліотечні блоки, коректно описують поведінку реальних модельованих вузлів. Для задання параметрів джерела струму мережі і ключових елементів використані *Three-phase source* і *Three-level bridge* відповідно з бібліотеки *SimPowerSystems*. Джерело змінної трифазної напруги враховує індуктивний і активний опір генератора(блок *Source*). В якості навантаження був узятий керований мостовий випрямляч блок *Zn*.

Силова частина моделі ККП складається з дев'яти однофазних мостових інверторів, по три в кожній фазі ($Sa1-Sa3$, $Sb1-Sb3$, $Sc1-Sc3$). Структурна схема системи управління коректор коефіцієнта потужності – блок регулятора (Control) і блок ШІМ(Faza), наведено на рис.2.18 і рис. 2.19 відповідно.

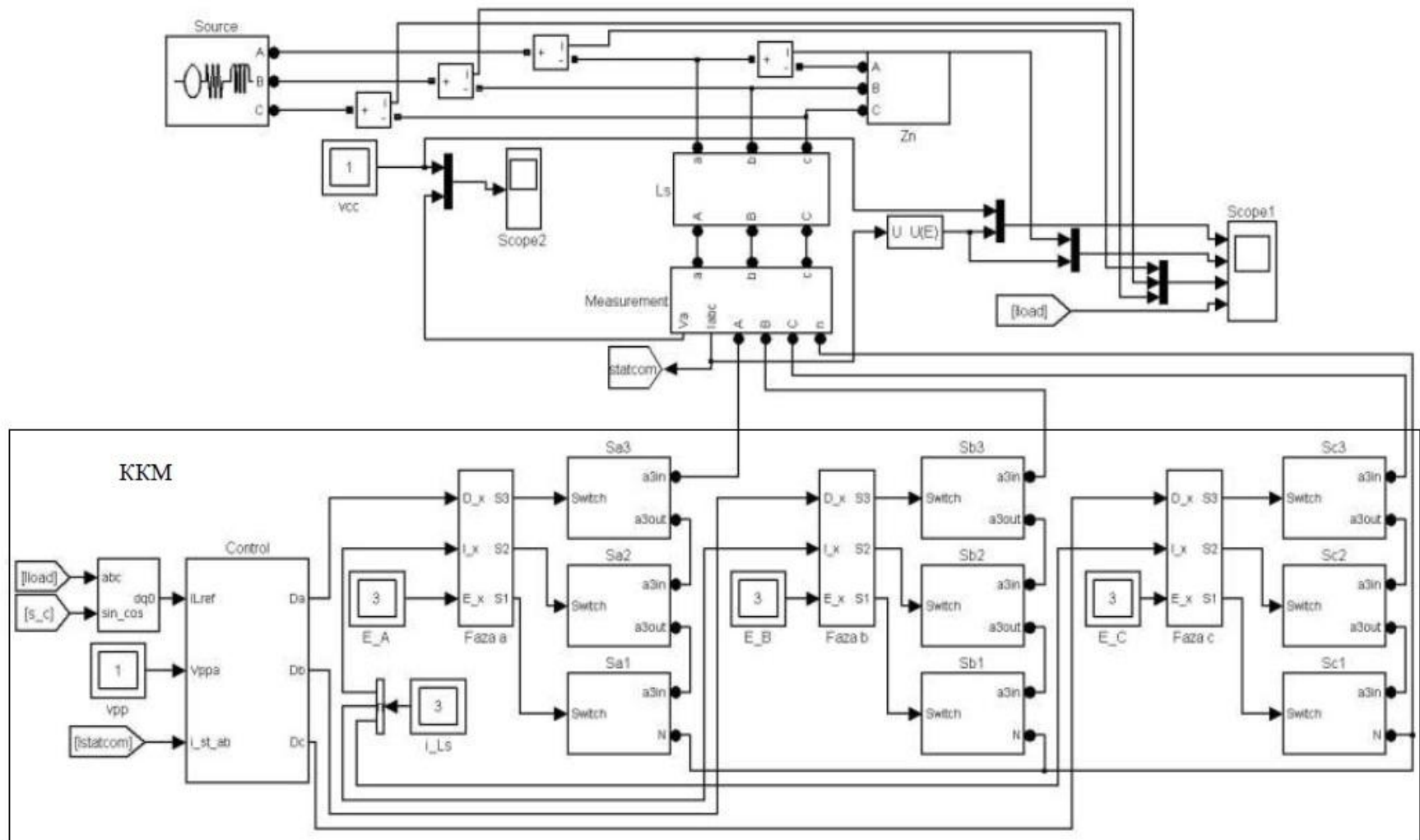


Рисунок 2.17 - Імітаційна модель чотирирівневого коректора коефіцієнта потужності

Блок розрахунку Control включає в себе перетворення Парка (пряме і зворотнє) і синхронізацію з мережею за допомогою фазове автопідстроювання частоти(ФАПЧ). ФАПЧ необхідне для синхронізації dq-координат з мережею. Вихідними даними блоку є синусна і косинусна функції, які однозначно визначають кут положення вектора трифазної напруги.

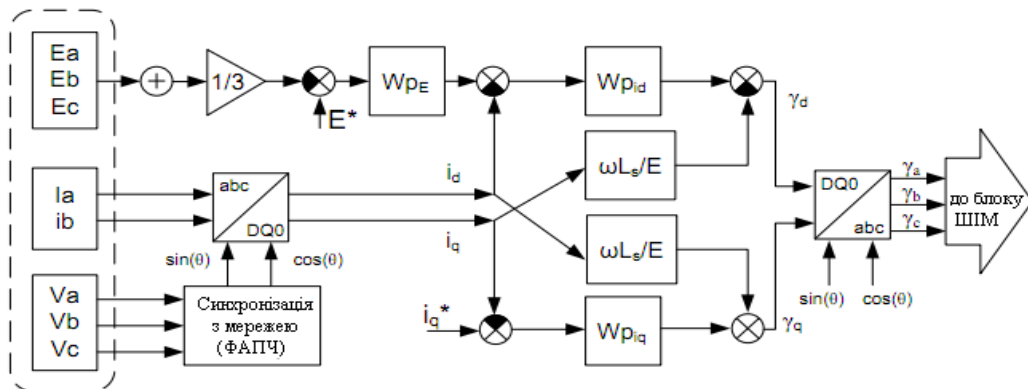


Рисунок 4.18 - Структурна схема системи управління

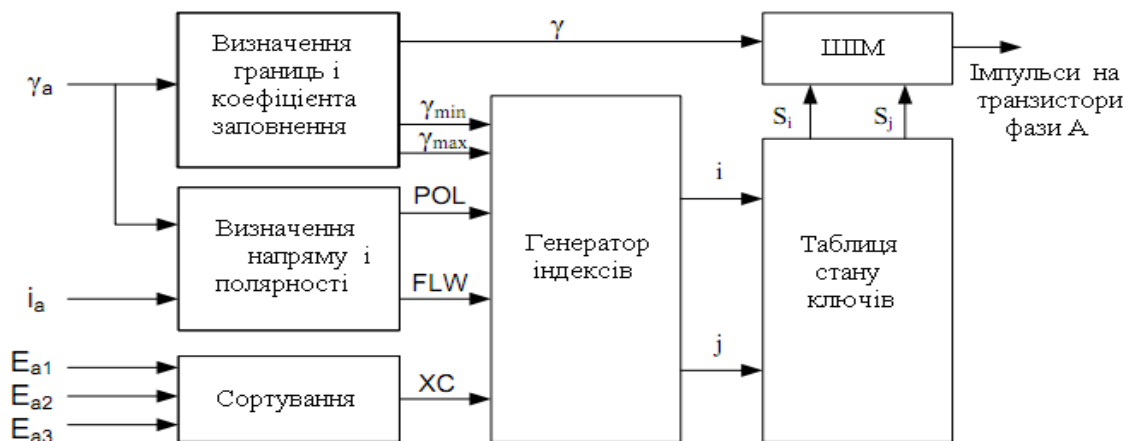


Рисунок 4.19. Функціональна схема блоку ШІМ

Блок ШІМ визначає включені напівпровідникові елементи. Алгоритм роботи блоків «Визначення меж і коефіцієнта заповнення», «Визначення напрямку і полярності» і «Сортування» реалізовані на мові програмування C++.

Часові залежності струму, що споживається навантаженням, струму ККП, а також струму мережі живлення, отримані в результаті імітаційного моделювання в програмному комплексі MATLAB Simulink, наведено на рис.2.20

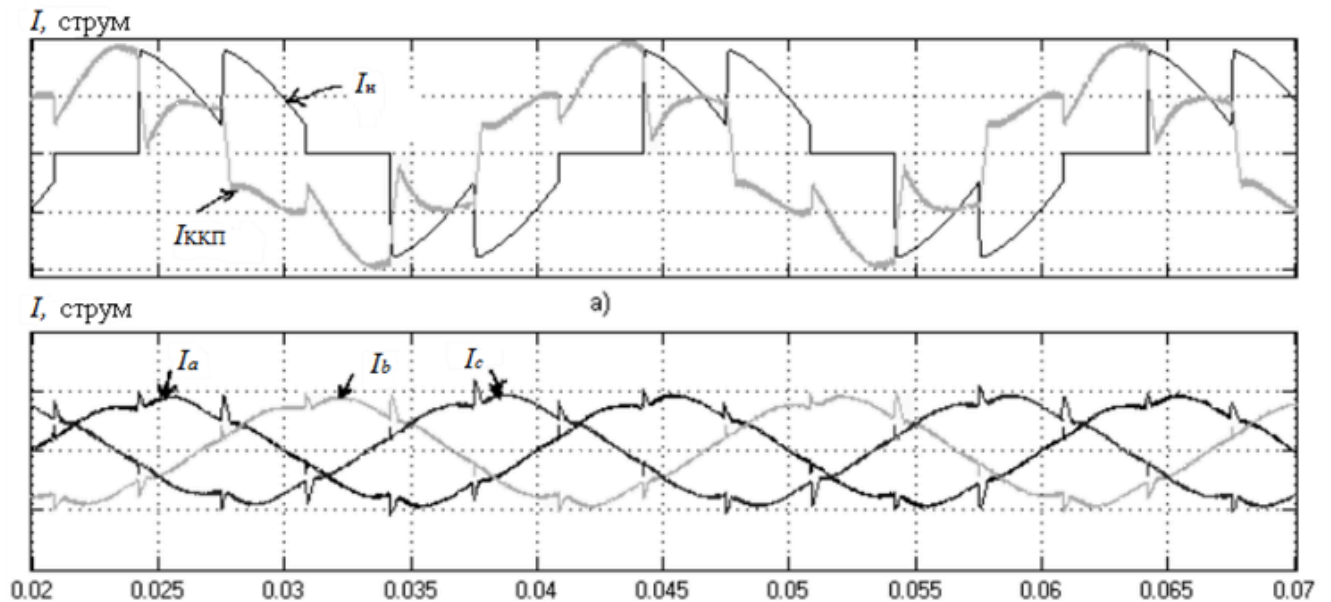


Рисунок 2.20 - Результати імітаційного моделювання: а – струм навантаження і струм ККП фази А; б – фазні струми мережі

Дослідження, проведені на імітаційній моделі, показали практично нульовий фазовий зсув між струмом і напругою мережі живлення, значне підвищення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і зниження коефіцієнта спотворень k_i (з 40% до 7% при $\alpha = 45$) у спектрі струму мережі живлення в повному діапазоні зміни кута управління випрямлячем, а також стійку роботу ККП в усталених і динамічних режимах. Використання ККП для потужності меншої 10% від номіналу небажане через зростання рівня вищих гармонік у вихідному струмі компенсації, і, як результат, - струмів мережі.

На імітаційній моделі було проведено дослідження роботи ККП у повному діапазоні регулювання кута управління керованого випрямляча. На рис. 2.21 представлено графічні залежності вищих гармонічних складових

струму мережі без використання і з використанням ККП. Для порівняння на графіках наведено теоретично отримані залежності [12].

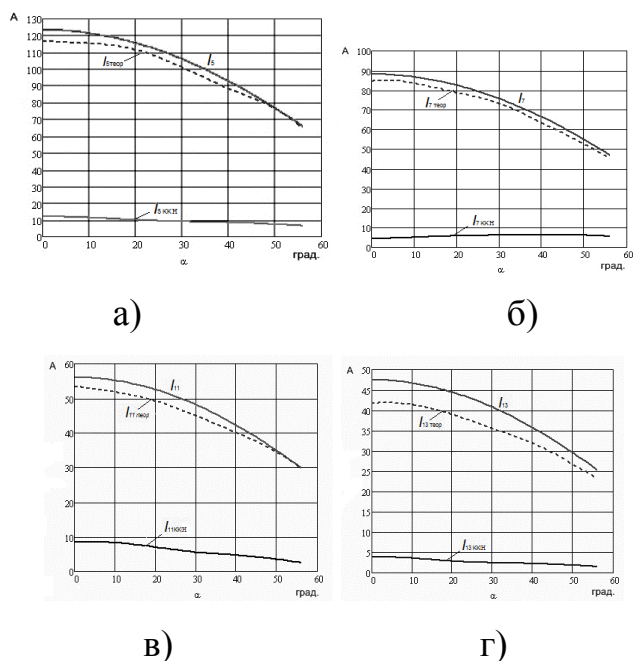


Рисунок 2.21- Залежності вищих гармонік струму мережі від кута управління: а-п'ята гармоніка; б-сьома гармоніка; в-одинадцята гармоніка; г-тринадцята гармоніка

Результати моделювання показали, що при використанні ККП зсув основної гармоніки в струмі мережі практично дорівнює нулю(рис. 2.22, а). Зменшення кута зсуву і рівня вищих гармонік призводить до збільшення коефіцієнта потужності(рис.2.22, б) і поліпшення електромагнітної сумісності.

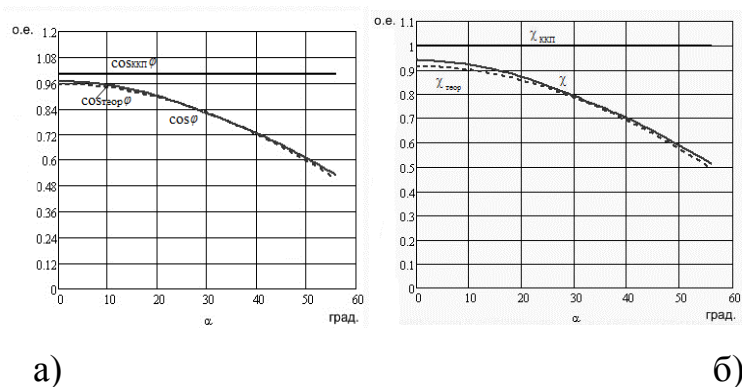


Рисунок 2.22– Залежності косинуса кута зсуву φ_1 першої гармоніки струму мережі (а) і коефіцієнта потужності від кута керування (б)

Висновки до розділу 4:

1. Розглянуто та проаналізовано компенсатори реактивної потужності: активні фільтри; синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів; на базі транзисторних перетворювачів; регулятори реактивної потужності, мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ, на базі багаторівневого каскадного інвертора.

2. Створення й освоєння високоефективних силових електронних приладів типу IGBT, IGCT та ін. дозволить:

радикально вирішити питання якості споживаної електроенергії (забезпечити одночасно КРП, фільтрацію ВГ, зменшення усталених відхилень і розмахів коливань напруги та її симетрування за фазами);

істотно знизити витрати на електротехнічне устаткування – електричні мережі, трансформаторне і розподільне устаткування;

створити принципово нові технічні рішення систем регулювання якості електроенергії.

3. Показано необхідність використання компенсуючи і коректуючи пристроїв для споживачів, що мають нелінійне і різко змінне навантаження. Від якості електроенергії на пряму залежать як економічні, так і техніко експлуатаційні показники.

4. Розроблено математичний опис ККП на базі багаторівневого каскадного інвертора напруги в синхронних dq-координатах, орієнтованих по вектору напруги мережі живлення. Використання багаторівневої топології на базі каскадного побудови силового інвертора більш вигідніше із-за економічного використання ключових і пасивних елементів, покращеної форми вихідної напруги інвертора, ідентичної їх побудови, а також простоти конструкції і математичного опису.

5. За розробленою математичною моделлю сформована імітаційна модель в середовищі Matlab\Simulink.

6. Дослідження на імітаційній моделі показали практично нульовий фазовий зсув між струмом і напругою мережі живлення, значне підвищення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і зниження коефіцієнта спотворень k_i (з 40% до 7% при $\alpha = 45^\circ$) у спектрі струму мережі живлення в повному діапазоні зміни кута управління випрямлячем, а також стійку роботу ККП в усталених і динамічних режимах. Використання ККП для потужності меншої 10% від номіналу небажане через зростання рівня вищих гармонік у вихідному струмі, і, як результат, - струмів мережі.

7. Результати порівняльного аналізу вищих гармонік, косинусу кута зсуву, коефіцієнта потужності, активної і реактивної потужностей на моделі без використання компенсатора і з використанням компенсатора підтверджують дані теоретичного розрахунку. Використання компенсатора підвищує косинус кута зсуву практично до 1, знижує вміст вищих гармонік у мережі приблизно в 10 разів, в результаті підвищується рівень енергоефективності.

З ВИБІР СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ

3.1 Стан питання

ВД характеризується незалежністю частоти обертання вала від частоти живильної мережі, забезпечує роботу приводу у всіх чотирьох квадрантах, а завдяки відсутності колектора, має більшу надійність і довговічність, вимагає менших витрат на обслуговування.

Крім того, ВД має регульовальні властивості, яких немає в жодного з відомих електроприводів - це тризонне регулювання частоти обертання (за напругою, струмом збудження і кутом випередження включення вентилів інвертора), а також можливість здійснення двома шляхами безконтактного реверсу без втручання в силові кола приводу (збільшенням кута випередження або реверсом двох фаз в колах датчика положення ротора). ВД також мають найвищі енергетичні характеристики і пускові моменти.

ВД є універсальним типом приводу з найкращими регульовальними і енергетичними характеристиками і сьогодні використовується для найрізноманітніших систем електроприводів: потужних і мікромашин, тихохідних і швидкохідних, що мають різні умови роботи і режими експлуатації. Використання ВД відкриває нові можливості щодо пуску надпотужних СМ і створення низько-і високошвидкісних регульованих приводів великої потужності. Пуск за схемою ВД забезпечує будь-яку необхідну плавність розгону.

Основною складовою частиною ВД є СМ, що володіє більш високими техніко-економічними показниками, ніж інші машини змінного струму. Вона характеризується високим ККД, можливістю роботи з випереджальним коефіцієнтом потужності, високою надійністю внаслідок значної величини повітряного зазору, пропорційальною залежністю статичної перевантажувальної здатності від напруги живлення. Втрати електричної

потужності в ній менше, ніж в АМ, навіть при зниженні магнітних навантажень активних частин останньої в результаті збільшення їх довжини.

3.2 Аналіз систем електроприводів з вентильними двигунами

Регульований електропривод з СМ з перетворювачами частоти будується за принципом зовнішнього або внутрішнього управління. При зовнішньому управлінні здійснюється принцип частотного регулювання при частоті мережі, що змінюється, аналогічно частотно-регульованому приводу (ЧРП) з АМ. У ВД управління інвертором перетворювача частоти здійснюється у функції кутового положення ротора двигуна, тобто здійснюється принцип внутрішнього управління. В будь-якому сталому режимі вихідна частота інвертора збігається з частотою ЕРС обертання СМ. Такий принцип дії електромеханічного перетворювача енергії в ВД.

Самокерований синхронний двигун має властивості машини постійного струму і тому називається безколекторним двигуном або ВД. Напівпровідниковий інвертор, керований розташованим на валу СМ датчиком положення ротора (ДПР), виконує функції механічного колектора, а вентилі інвертора струму - функції ковзаючого щіткового контакту машини постійного струму.

Режим роботи ВД за принципом дії істотно відрізняється від частотно-регульованих і СМ, що живляться від мережі. У порівнянні з СМ, що живиться від перетворювача частоти із зовнішнім управлінням, в якому частота інвертора струму (напруги) задається примусово, привод з ВД має такі переваги:

має властивість автокомутації, тобто перетворення напруги живлення (струму) в частоту і фазу ротора, завдяки чому в ВД неможливий асинхронний режим коли частота ЕРС обертання СМ не співпадає з частотою джерела живлення;

тризонне регулювання частоти обертання і можливість здійснення безконтактного реверса двома шляхами без втручання в силові кола приводу;

перевантажувальна здатність ВД не залежить від перекидаючого моменту СМ, а визначається встановленою потужністю перетворювача. При перевантаженні ВД знижує швидкість, але не виходить з синхронізму;

ВД має високий пусковий момент.

На основі аналізу літератури можна запропонувати класифікаційну схему ВД за наступними ознаками (рис.3.1): способом управління збудженням, схемою і структурою комутатора, а також способом комутації.

Найбільшого поширення набули ВД з перетворювачем з ланкою постійного струму (ВД постійного струму) і з перетворювачем з безпосереднім зв'язком (ВД змінного струму), що працюють в режимі джерела струму (рис. 3.2) [13,14]. Якщо в схемі (рис. 3.2, а, штрихові лінії) включити обмотку збудження СМ в коло дроселя або регулювати струм збудження у функції струму статора, то ВД набуває властивостей ВП послідовного збудження. Якщо ж обмотку збудження живити від окремого джерела, то характеристики ВД подібні характеристикам ВП незалежного збудження. Регулювання швидкості можливо в обидві сторони від синхронної, а режим реверсування встановлюється без перемикачів в силових колах приводу.

Відомо, що вентилі перетворювача вибираються за величинами максимального струму і напруги мережі. Умови вибору вентилів для живлення АМ і РМ по напрузі аналогічні, а по струму істотно відрізняються. При одному і тому ж електромагнітному моменті, швидкості і напруги струм СМ при перевантаженні може бути зменшений в порівнянні зі струмом перевантаження АМ в 1,5-2 рази. У перетворювачах зі штучною комутацією, що забезпечують локалізацію енергії магнітних полів окремих фаз СМ за допомогою внутрішніх кіл інвертора, створюються умови для спрощення вхідної частини перетворювача - випрямляча. На відміну від АМ, СМ при роботі в генераторному режимі не потребує споживання від мережі реактивної потужності, тому при виключенні зворотних діодів зі схеми інвертора відпадає необхідність в установці другої групи вентилів випрямляча.

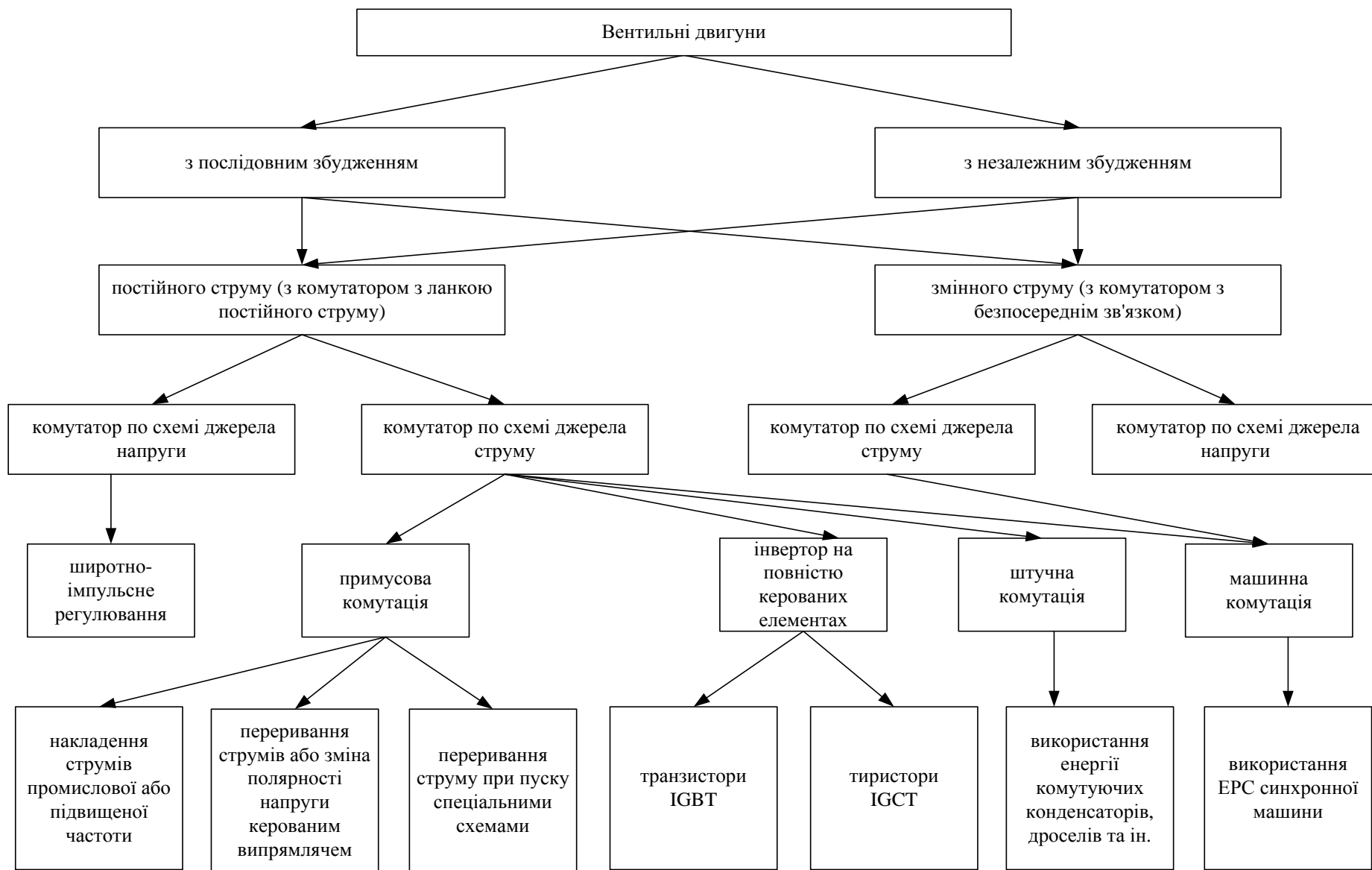


Рисунок 3.1 - Класифікація схем ВД

Один і той же керований випрямляч може бути використаний як для передачі потужності від мережі, так і для повернення її в мережу.

Таким чином, при заміні ЧРП на ВД сумарна потужність вентилів перетворювача з ланкою постійного струму зменшується майже в два рази. У ще більшій мірі зменшується потужність комутуючого конденсатора і згладжувального дроселя.

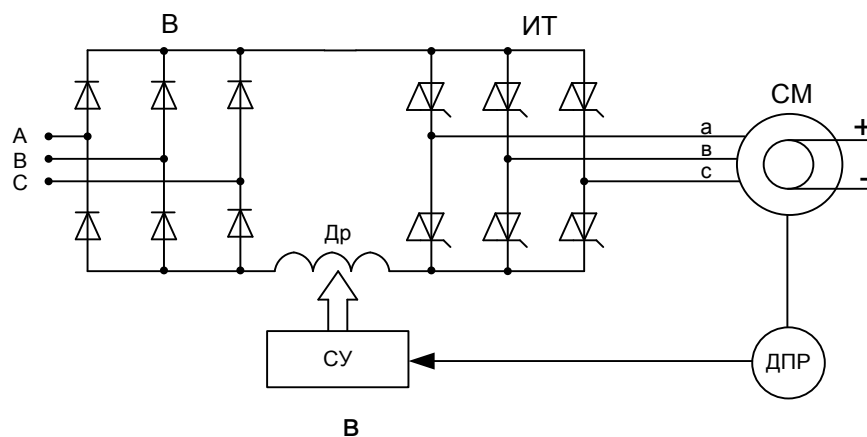
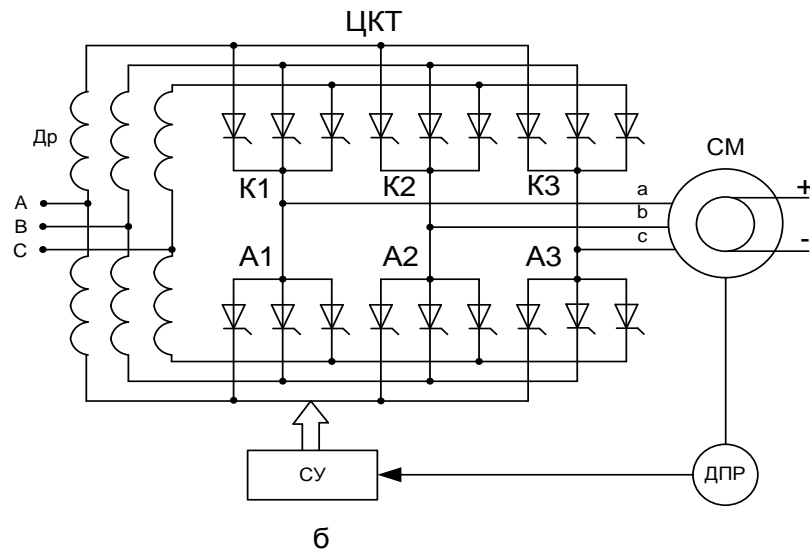
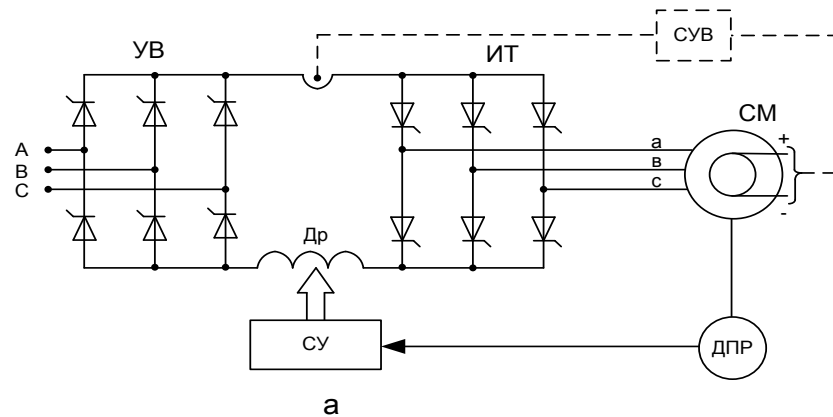


Рисунок 3.2 - Схеми ВД постійного (а), (в) і змінного (б) струму: КВ, ІС, ЦКТ - керовані випрямляч, інвертор струму і ціклоконвертор, СН, СУЗ – системи управління відповідно напругою і струмом збудження; Др - дросель; СМ - синхронна машина, ДПР - датчик положення ротора

На відміну від ЧРП в ВД постійного струму на тиристорах SCR (рис. 3.2, а, б) комутація інвертора здійснюється за рахунок реактивної енергії двигуна. Висока перевантажувальна здатність СМ у схемі ВД з машинною комутацією дозволяє спростити вихідну частину перетворювача, силову схему інвертора - виключити з його складу зворотні діоди і комутуючі вентиля, що робить систему енергоефективною. Але під час пуску і за низьких швидкостей ($f_{гр} \leq (0,1-0,2) f_0$, де $f_{гр}$ - гранична частота машинної комутації; f_0 - частота мережі) відбувається зрив комутації через відсутність або малої величини ЕРС.

Для схеми ВД постійного струму можливі наступні способи пуску: асинхронний, як у звичайної СМ, з штучної або примусової комутацією; із застосуванням некерованого випрямляча і інвертора на повністю керованих силових елементах IGBT або IGCT (рис. 3.2, в).

Перший спосіб може використовуватися в приводах з рідкими пусками, але при своїй простоті він має серйозні недоліки, наприклад, перевантаження в мережі, додаткове нагрівання двигуна, ускладнення силової схеми.

Другий спосіб пуску здійснюється декількома шляхами: використанням енергії комутуючих елементів [14,15], накладенням струмів промислової або підвищеної частоти [14], перериванням струму спеціальними схемами примусової комутації [14,15,16], перериванням струму або зміною полярності напруги за допомогою керованого випрямляча [6,18]. Найбільш широке застосування отримав останній спосіб, який здійснюється відсіченням керуючих імпульсів або циклічним переключенням випрямляча в інверторний режим з частотою проходження сигналів від ДПР [17,19].

Для схем з примусовим замиканням тиристорів комутатора можна виділити наступні режими: кроковий при частотах $0 < f < f_{ш}$ і безперервний при $f_{ш} < f < f_{гр}$. В кроковому режимі в момент чергової примусової комутації швидкість і струм дорівнюють нулю. Характерних для зазначених систем є зменшення

пускового моменту двигуна на 20-30% [17,18], що вимагає збільшення потужності машини для забезпечення заданих пускових характеристик. Крім цього, нестаціонарне завантаження мережі реактивної потужністю призводить до субгармонійних пульсація напруги живлення і до нерівномірного завантаженні вентилів перетворювача, а також обмоток трансформатора мережі.

ВД зі штучною комутацією (з автономним інвертором) вільних від недоліків схем з машинною комутацією [14,20]. В такому приводі можлива робота з нульовим кутом випередження і малими значеннями пульсацій моменту. Крім того, можливий режим з відстаючим струмом, коли реакція якоря є намагнічуючою. Проте використання штучної комутації істотно ускладнює силові ланцюги і системи управління, що значно підвищує вартість і знижує надійність приводу.

Третій спосіб пуску не використовує корисні властивості СМ - машинну комутацію і є більш дорогим у порівнянні зі схемами на традиційних тиристорах SCR. При використанні некерованого випрямляча і інвертора на повністю керованих силових елементах IGBT або IGCT (рис. 3.2, в) застосовується широтно-імпульсне регулювання напруги на статорі двигуна.

Найбільш просто проблема пуску вирішується в системі з циклоконвертором (рис. 3.2, б), в якій функції випрямлення і інвертування виконують одні й ті самі тиристори, чим досягається перетворення напруги і частоти джерела безпосередньо в напругу і частоту двигуна [14,21,22]. Така система містить більше число тиристорів, ніж двигун з ланкою постійного струму, але, завдяки відсутності пускових пристроїв, однократному перетворенню енергії та зменшенню теплового струму тиристора, вона енергоефективна та надійна [23].

Трифазний мостовий циклоконвертор складається з шести груп тиристорів. Катодні групи формують позитивні напівхвилі струму навантаження, анодні - негативні. Різнополярні тиристорні групи кожної фази двигуна включаються по черзі, таким чином можна виключити появу в навантаженні постійної складової зрівняльного струму.

Послідовність включення груп визначається датчиком положення і залежить від заданого напрямку обертання і положення ротора двигуна щодо магнітних осей фаз статора. Тиристори всередині груп відмикаються сигналами, синхронізованими з частотою мережі живлення. Число включень кожного тиристора в групі залежить від співвідношення частот мережі і двигуна. Ланцюг протікання струму через статорні обмотки двигуна створюється одночасним включенням двох тиристорів в різних фазах мережі і статора.

У наведеній схемі природна комутація здійснюється у всьому швидкісному діапазоні роботи ВД між тиристорами як однієї групи, так і різних груп. Останнє відбувається при збігу в часі сигналів на перемикання фаз мережі і двигуна. Машинна комутація виконується за допомогою ЕРС двигуна між тиристорами однополярних груп при частотах $F \geq f_{гр}$.

Аналіз систем електроприводів з ВД показує, що найбільш енергоефективними і надійними є схеми з комутаторами, що працюють в режимі джерела струму з природною і машинною комутацією.

3.3 Способи управління вентильним двигуном

На рис. 3.3 представлена векторна діаграма, а на рис. 3.4 показано схематичне розташування магнітних осей, обмоток і векторів ВД з струмовим комутатором. Смуга пропускання комутатора регулюється зміною кута випередження β_0 або β (тут β_0 , β - кути між струмом і відповідно ЕРС холостого ходу і напругою машини). Існують наступні способи управління комутатором ВД [14,20,25].

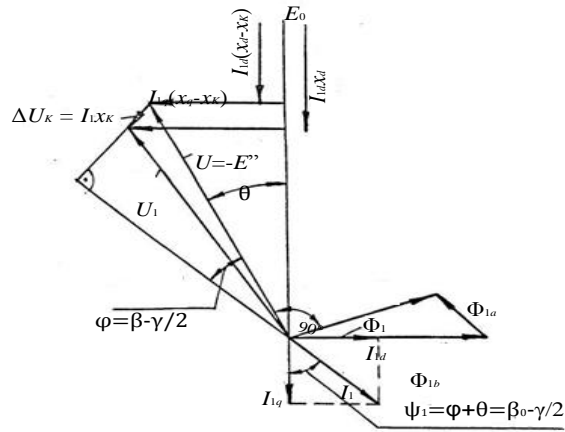


Рисунок 3.3 - Векторна діаграма ВД

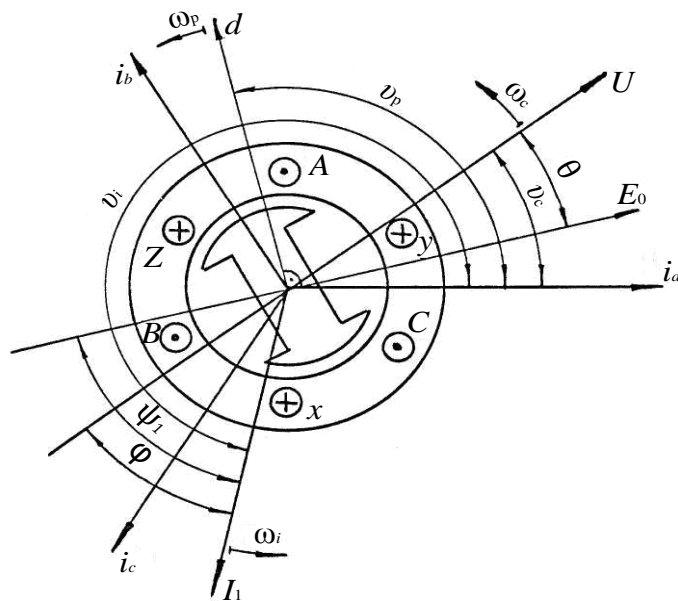


Рисунок 3.4 - Схематичне розташування магнітних осей, обмоток і векторів ВД

Перший (найпростіший) спосіб управління полягає в підтриманні постійного значення кута випередження $\beta_0 = \text{const}$. При цьому джерелом напруги синхронізації служить ДПР. З векторної діаграми ВД (рис. 3.3) фазовий зсув між першою гармонікою струму і ЕРС холостого ходу визначається наступним чином

$$\psi_1 = \varphi + \theta = \beta_0 - \frac{\gamma}{2}, \quad (3.1)$$

де φ - кут зсуву між векторами основної гармоніки струму і фазної напруги;
 θ - кут навантаження СМ; γ - кут комутації.

При другому способі управління підтримується постійним кут випередження $\beta = \text{const}$. Джерелом напруги синхронізації є датчик напруги статора (ДНС) [25]. В цьому випадку вираз (3.1) набуде вигляду

$$\psi_1 = \beta - \frac{\gamma}{2} + \theta. \quad (3.2)$$

Третій спосіб полягає в підтримці постійної величини кута запасу δ на мінімальному рівні

$$\beta_0 = \beta_{0\min} = f(\gamma, \theta) \text{ при } \delta = \delta_{\min} = \text{const} \quad (3.3)$$

$$\beta = \beta_{\min} = f(\gamma) \text{ при } \delta = \delta_{\min} = \text{const}. \quad (3.4)$$

При цьому

$$\psi_1 = \frac{\gamma}{2} + \delta_{\min} + \theta. \quad (3.5)$$

Останній спосіб управління вимагає наявності датчиків кутів комутації та навантаження, а також системи імпульсно-фазового управління (СІФУ) синхронізованою від ДПР (3.3) або ДНС (3.4).

3.4 Математична модель синхронної машини

Електропривод з ВД представляє собою багатовимірну ЕМС з нелінійним багатомірним об'єктом керування. Однак для інженерних розрахунків при проектуванні, виборі та оптимізації електрообладнання, аналізі і синтезі систем автоматичного регулювання (САР) необхідно мати моделі та структурні схеми ВД з досить простими передавальними функціями.

Основою такого підходу є об'єднання математичних моделей СМ, перетворювача і способів управління ними. При цьому автори виходять з положень сучасної математичної теорії електричних машин, загальних основ розрахунку напівпровідникових перетворювачів і теорії автоматичного управління.

Формування результуючого магнітного потоку в залежності від кута повороту ротора ВД пояснює рис. 3.5. Завдяки згладжуючій дії магнітної системи СМ в діапазоні частот машинної комутації магнітний потік наводить в обмотках статора машини практично синусоїдальні ЕРС.

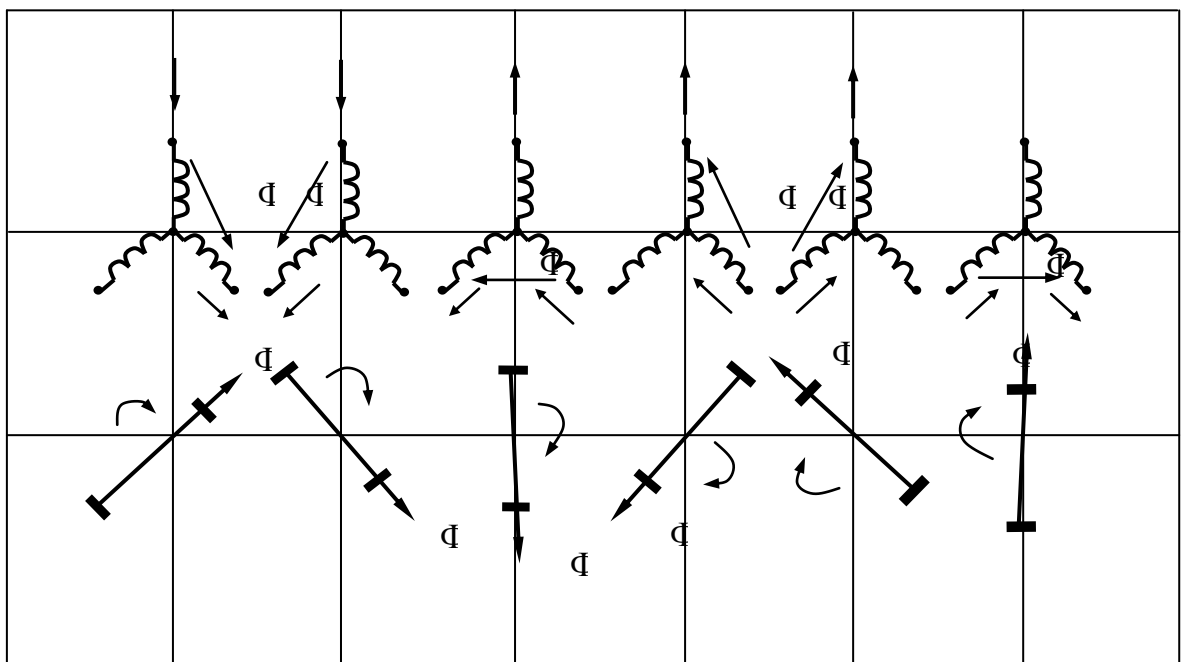


Рисунок 3.5 - Формування результуючого магнітного потоку в залежності від кута повороту ротора ВД

Відомо кілька видів моделей СМ - на основі узагальненої двофазної машини ($\alpha - \beta$, $x - y$, $d - q$) і в природних трифазних осях на основі лінійних або фазних напруг. Моделі $x - y$, $d - q$ синхронізовані з частотою поля статора або

ротора і частіше застосовуються в разі живлення СМ синусоїдальною напругою.

Для складання моделі скористаємося системою нелінійних диференціальних рівнянь Парка-Горева для ідеалізованої явнополіусної СМ [26,27,28].

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + i_d r - \psi_q \omega_p; \\
 U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + i_q r - \psi_d \omega_p; \\
 U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + i_f r_f; \\
 U_{kd} &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + i_{kd} r_{kd}; \\
 U_{kq} &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + i_{kq} r_{kq}; \\
 \frac{d\omega_p}{dt} &= \frac{1}{H_J} (M - M_C); \\
 M &= \psi_d i_q - \psi_q i_d; \\
 \frac{d\omega_p}{dt} &= \omega_p,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

де $\psi_d, \psi_q, U_d, U_q, i_d, i_q$ - відповідно потокозчеплення, напруги і струми обмоток статора по осях d і q ; r - активний опір фази статора; ψ_f, U_f, i_f - відповідно потокозчеплення, напруга і струм обмотки збудження; r_f - активний опір обмотки збудження; $\psi_{kd}, \psi_{kq}, U_{kd}, U_{kq}, i_{kd}, i_{kq}$ - відповідно потокозчеплення, напруги і струми компенсаційних обмоток ротора СМ по осях d і q ($U_{kd} = U_{kq} = 0$); r_{kd}, r_{kq} - активні опори компенсаційних обмоток ротора по осях d і q ; H_J - інерційна постійна.

Потокозчеплення визначається наступним чином

$$\psi_d = x_d i_d + x_{ad} (i_f + i_{kd});$$

$$\begin{aligned}
\Psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_q; \\
\Psi_f &= x_f i_f + x_{ad} (i_d + i_{kd}); \\
\Psi_{kd} &= x_{kd} i_{kd} + x_{ad} (i_d + i_f); \\
\Psi_{kq} &= x_{kq} i_{kq} + x_{aq} i_q,
\end{aligned} \tag{3.7}$$

де x_d, x_q, x_{kd}, x_{kq} - індуктивності обмоток статора і ротора по осях d і q ; x_f - індуктивність обмотки збудження; x_{ad}, x_{aq} - взаємодійності за поздовжньою і поперечною осями.

При запису рівнянь (3.6), (3.7) враховувалися припущення [28,29]: магнітна ланцюг машини не насичена, фазні обмотки симетричні, просторові гармоніки намагнічуючих сил ротора і статора відсутні, демпферні обмотки ротора можуть бути замінені двома еквівалентними контурами, відсутні втрати в сталі, вентилі комутатора представляють собою ідеальні ключі, джерелом живлення служить генератор трифазної системи синусоїдальних ЕДС.

Всі параметри і змінні в рівняннях (3.6), (3.7) представлені у відносних одиницях. Для приведення роторних величин до статорні, використовується "система x_{ad} " [26,30].

В якості базисних величин прийняті: амплітудні значення перших гармонік номінальної фазної напруги $U_{H(1)}$ і струму $I_{H(1)}$; синхронна частота обертання поля статора $\omega_0 = 2\pi f_0 / p$; потокозчеплення, яке індукує в обмотці статора при ω_0 амплітудне значення першої гармоніки номінального фазної напруги; опір статора $Z_H = U_{H(1)} / I_{H(1)}$; номінальна потужність $P_H = 1,5 U_{H(1)} I_{H(1)}$; номінальний момент $M_H = P_H / \omega_0$; індуктивність статора $L_0 = Z_H / \omega_0$.

Стосовно до СМ, яка працює на мережу, наведені рівняння розглядаються за умови сталості частоти обертання ротора. Для ВД в рівняннях напруг нелінійність з'являється зі зміною частоти обертання, а в рівняння моментів - через добуток струмів. Якщо характер зміни частоти обертання відомий, то рівняння напруг стають лінійними, а рівняння моментів відпадає. Якщо він невідомий, то з урахуванням припущення про незначну зміну напруги

живлення і навантажувального моменту можна отримати наближені рішення нелінійних рівнянь після введення деяких спрощень (не враховуються активний і комутаційний опір, кути комутації із запасу, кут навантаження приймається постійним) .

При дослідженні перехідних процесів в замкнутих системах або в декількох машинах необхідно вирішити систему нелінійних рівнянь, що містить рівняння електричних машин і регуляторів. Тому для розв'язання рівнянь (3.6) і (3.7) найбільш доцільно скористатися апаратом чисельних методів.

Головна відмінність ВД від СМ, яка працює на мережу або в частотно-регульованою схемою, полягає у самоврядуванні за частотою живлення, яке здійснюється за допомогою зворотнього зв'язку по положенню ротора. Тому систему Парку-Горева необхідно доповнити рівняннями зворотного зв'язку по положенню і рівняннями переходу струмів і напруг від перших гармонік до реальних величинам[31].

Вирішуючи рівняння з допомогою засобів обчислювальної техніки, можна досліджувати з урахуванням вищих гармонік статичні і динамічні режими ВД, а також отримати при заданій структурі чисельні значення коефіцієнтів передавальної функції.

3.5 Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи із синхронними двигунами

Основною причиною виникнення аварій та низької енергоефективності електромеханічних систем є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт, недостатній рівень експлуатації тощо (рис. 3.6).

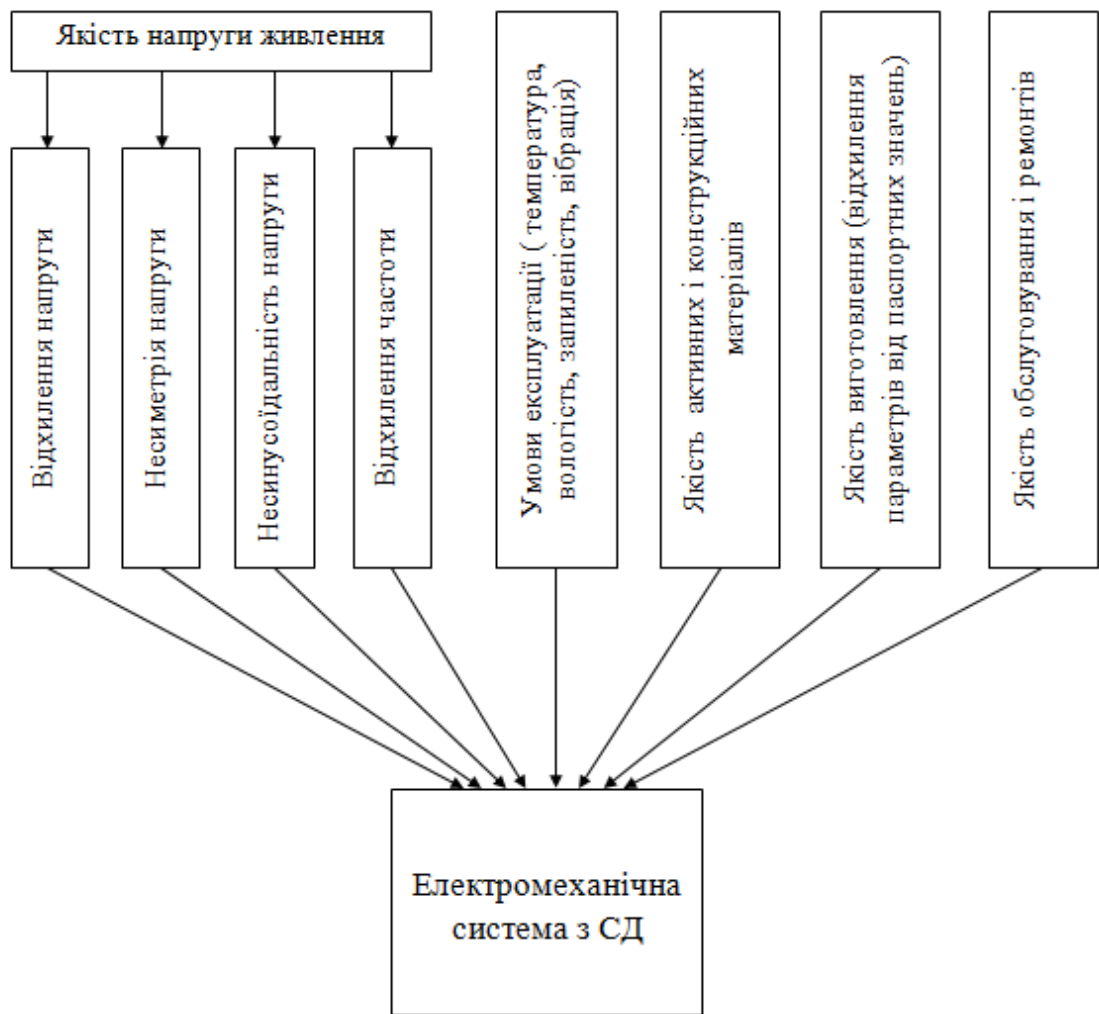


Рисунок 3.6- Фактори впливу на енергоефективність та технічний стан ЕМС з СД

Несинусоїдальність напруги характеризується:

Коефіцієнтом несинусоїдності кривої напруги $k_{нс}$

$$k_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{ном}} 100$$

де $U_{(n)}$ - діюче значення n -ої гармонічної складової напруги, В; n - порядок гармонічної складової напруги, N - порядок останньої з гармонічних складових напруги, стандартом встановлюється $N = 40$; $U_{ном}$ - діюче значення напруги, В.

Коефіцієнтом n -ої гармонічної складової напруги $k_{u(n)}$

$$k_{u(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{ном}} 100$$

Стандарт дозволяє не враховувати гармонічні складові порядків понад 40 або ті, значення яких менші за 0,3%.

Запишемо математичну модель синхронного двигуна при несинусоїдальній напрузі живлення (на рис. 3.7 зображено модель СД з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі matlab.) [32]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{cA}}{dt} = u_{cA} - \frac{1}{3}((4R_{cA} - R_{cC})i_{cA} + (R_{cB} - R_{cC})i_{cB}); \\ \frac{d\psi_{cB}}{dt} = u_{cB} - \frac{1}{3}((R_{cA} - R_{cC})i_{cB} + (4R_{cB} - R_{cC})i_{cB}); \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \quad \frac{d\psi_d}{dt} = -R_d i_d; \quad \frac{d\psi_q}{dt} = -R_q i_q; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0^2}{J} \sqrt{3}(\psi_{cA} i_{cB} - \psi_{cB} i_{cA}) - \frac{p_0 M}{J}; \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (3.8)$$

де ψ – потокозчеплення обмотки статора; u_c, i_c, R_c – напруга, струм та резистивні опори окремих фаз статора; p_0 - кількість пар полюсів машини; J - момент інерції; M - механічний момент; γ - кут повороту ротора.

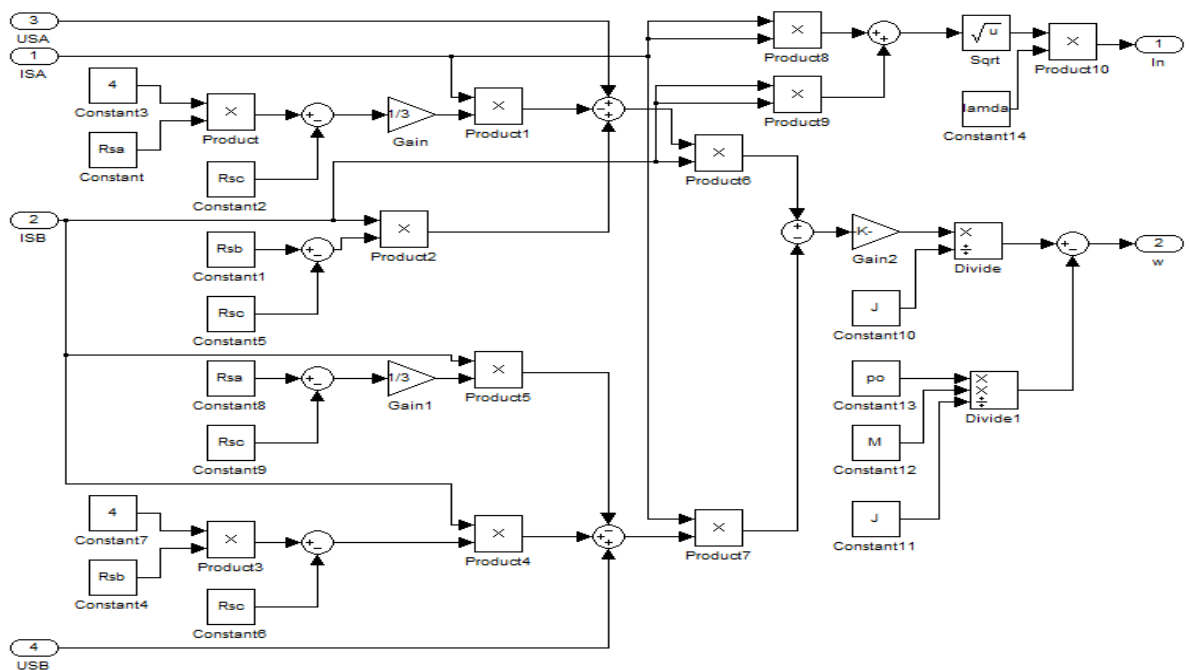


Рисунок 3.7 - Модель синхронного двигуна з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі Matlab

В наведеній моделі (3.8) параметри СД не залежать від частоти живильної напруги. Згідно з вимогами ГОСТ 13109-97 коефіцієнт v -ї гармонічної складової напруги не повинен перевищувати 5 % [33].

На рис. 3.8 зображено часові діаграми пускового струму та швидкості за результатами комп'ютерного моделювання.

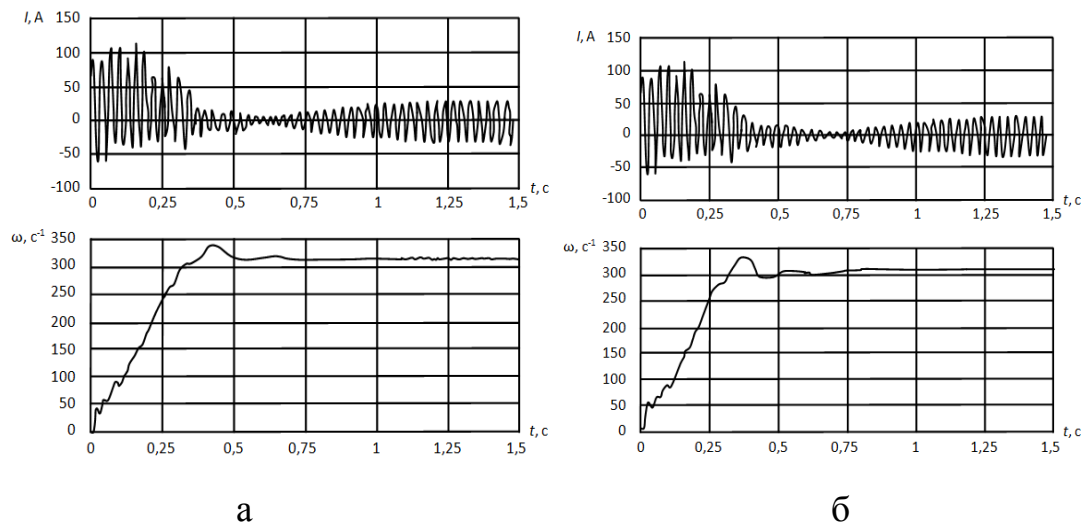


Рисунок 3.8 - Результати моделювання синхронного двигуна

а – $v = 2$; б – $v = 11$

Проведені розрахунки показують, що наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливань швидкості в усталеному режимі, а отже - до погіршення ефективності роботи електропривода.

Відхилення напруги – це різниця між дійсним і номінальним значеннями напруги.

$$\delta U = U - U_{ном}; \quad \delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} 100$$

В умовах нормальної роботи на затискачах електродвигунів та апаратів для їх пуску та управління відхилення напруги від номінального значення

допускаються в межах від -5 до +10%. У післяаварійних режимах допускається додаткове зниження напруги на 5%.

Збільшення напруги призводить до зростання струму намагнічування двигуна з боку статора і зниження індуктивного опору взаємної індукції по поздовжній осі x_{ad} двигуна в порівнянні з номінальним режимом

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{k_U F_{\delta 0}} = \frac{0,9 k_{ad} m I_{ном} k_P \frac{\omega_1 k_{01}}{p}}{k_U F_{\delta 0}}$$

де k_{ad} коефіцієнт, для переходу від обмотки якоря до обмотки збудження; $F_{\delta 0}$ - магнітна індукція в зазорі; ω_1 - число послідовно з'єднаних витків, яким при цьому магнітному потоці визначається значення ЕРС у фазі обмотки; k_{01} - обмотковий коефіцієнт; k_U - відносне значення напруги.

Зі зменшенням значення x_{ad} знижується і опір $x_d = x_{ad} + x_{\sigma}$. Це в свою чергу, викликає [34] непропорційне зниження струму збудження

$$I_{3*}^2 = \frac{1 + k_P^2 x_d^2 \cos^2 \varphi_{ном} + \alpha^2 x_d^2 \sin^2 \varphi_{ном} + 2 \alpha x_d \sin \varphi_{ном}}{1 + x_d^2 + 2 x_d^2 \sin \varphi_{ном}} \quad (3.9)$$

де $k_P = P/P_{ном}$, $\alpha = Q/Q_{ном}$, - відносні навантаження статора відповідно за активною та реактивною потужністю; x_d - опір двигуна по поздовжній осі, відповідне насичення магнітного кола при холостому ході і номінальній напрузі статора.

Для синхронних електродвигунів згідно (3.9) збільшення напруги на 10% призводить до відповідної залежності складової індуктивного опору двигуна по поздовжній осі полюсів x_{ad} від завантаження двигунів активною потужністю k_P

$$x_{ad} = \frac{0,9 k_{ad} m I_{ном} \frac{\omega_1 k_{01}}{p} I_{ном} k_P}{1,1 F_{\delta 0}} = 1,091 k_P$$

де $1,1F_{\delta 0}$ - магнітна напруга повітряного зазору для напруги, що дорівнює $1,1U_{ном}$.

Тоді при характерному завантаженні синхронних двигунів активною потужністю $k_p = 0,7-0,85$ значення x_d будуть змінюватися в межах $0,903 \div 1,066$, струми збудження, визначені за (3.9), необхідно підтримувати в межах $0,878 \div 0,923$ від номінального значення.

Значний вплив спричиняють відхилення напруги на термін служби синхронного двигуна (термін служби скорочується при зниженні напруги і великому завантаженні двигуна). У цьому випадку збільшується струм двигуна і відбувається більш інтенсивне старіння ізоляції. Так, при номінальному завантаженні двигуна та відхиленні напруги на затискачах на 10% термін його служби скорочується вдвічі.

Несиметрія напруг. При несиметрії напруг мережі в синхронних машинах поряд з виникненням додаткових втрат активної потужності і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації внаслідок появи знакозмінних обертаючих моментів і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, а особливо - за недостатньої міцності й наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій, як правило, не виникають. При несиметрії напруг в 2% терміни служби синхронних двигунів скорочуються на 16,2%.

Як міру несиметрії напруг використовують коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності k_{2U} , який дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності $U_{зв}$ до напруги прямої послідовності $U_{пр}$ [33]:

$$k_{2U} = \frac{U_{зв}}{U_{пр}} 100\%$$

Несиметрія трифазної системи напруг виникає в результаті накладення на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що призводить до зміни абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис.3.9.а.). Крім несиметрії, що викликається напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладання на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних (рис.3.9.б.).

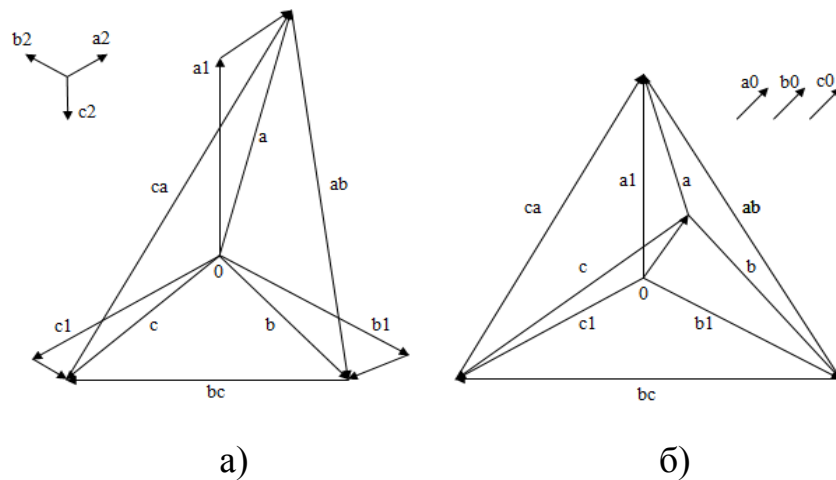


Рисунок 3.9 - Векторна діаграма напруг

а – пряма і зворотня послідовність; б – пряма і нульова послідовність

Струм основної частоти являє собою струм зворотної послідовності I_2 і визначається рівністю[35]:

$$I_2 = \frac{Z_{d2} + Z_{q2}}{2Z_{d2}Z_{q2}} \dot{U}_2 TB$$

Відносне значення струму знижується при збільшенні тривалості ввімкнення. В результаті великі темпи зростання струмів в обмотках електродвигуна при несиметрії мережі спостерігаються при збільшенні тривалості ввімкнення (рис.3.10).

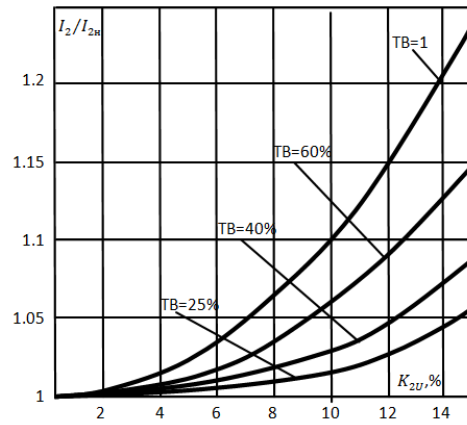


Рисунок 3.10 - Графіки залежності струму зворотної послідовності для різної тривалості ввімкнення.

Відхилення частоти. Під відхиленням частоти розуміють різницю між дійсним і номінальним значеннями основної частоти

$$\Delta f = f - f_{ном}; \quad \Delta f = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} 100$$

У нормальному режимі роботи енергосистеми допускають відхилення частоти, усереднені за 10 хв, в межах від -0,1 Гц до +0,1 Гц. Допускається тимчасова робота системи з відхиленням частоти, усередненим за 10 хв, в межах від -0,2 Гц до +0,2 Гц.

Розмах коливань частоти - різниця між найбільшим і найменшим значеннями частоти за певний проміжок часу

$$\delta f = f_{нб} - f_{нм}; \quad \delta f = \frac{f_{нб} - f_{нм}}{f_{ном}} 100$$

Під коливанням частоти розуміють її зміну, що відбувається зі швидкістю 0,2 Гц за секунду. Розмах коливань частоти не повинен перевищувати 0,2 Гц.

Намагнічувальний струм СД збільшується при зменшенні частоти і зменшенні x_{ad} зі зростанням насичення, обумовленим збільшенням магнітного потоку [36].

$$I_*^2 = k_f (k_p^2 \cos^2 \varphi_{ном} + \alpha^2 \sin^2 \varphi_{ном}) \quad (3.10)$$

Струм статора і реактивна потужність. Зміна частоти викликає зміну активної та реактивної складових струму статора. Як видно з (3.10), при заданому навантаженні на валу активна складова змінюється обернено пропорційно напрузі мережі, реактивна - за більш складним законом, оскільки при зміні напруги змінюється α . Визначимо зміну реактивної складової струму статора з урахуванням зміни насичення:

$$\left(\frac{I_{zf}}{I_{зном}} \right)^2 = \left(\frac{k_{zx}}{k_\mu} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{k_f} \right)^2 + \frac{2x_d \sin \varphi_{ном}}{k_f} \alpha + x_d^2 \sin^2 \varphi_{ном} \alpha^2 + x_d^2 \cos^2 \varphi_{ном} k_p^2 \right] \quad (3.11)$$

Після розв'язання (3.11) відносно α знайдемо реактивну потужність в частках номінальної реактивної потужності:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\left(\frac{k_{zf} k_\mu}{k_{zx}} \right)^2 - (k_p x_d \cos \varphi_{ном})^2} - \frac{1}{k_f}}{x_d \sin \varphi_{ном}} \quad (3.12)$$

Рівняння (3.12) наочно показує, що при зниженні частоти і незмінному струмі збудження реактивна потужність, що видається в мережу, зменшується. За наявності автоматичного регулятора збудження струм збудження буде збільшуватися, відповідно зросте і реактивна потужність, що видається в мережу [37].

Залежність реактивної потужності (α) і струму статора (I_*) синхронного двигуна від частоти і напруги представлені на рис.3.11.

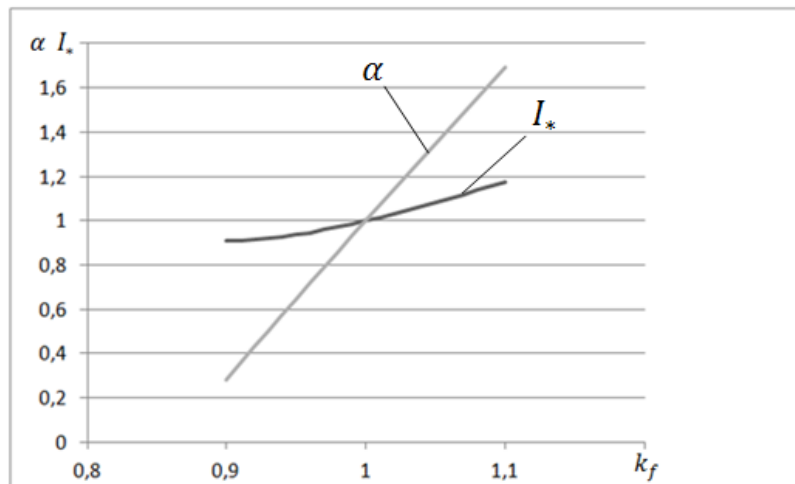


Рисунок 3.11 - Залежність реактивної потужності (α) і струму статора (I_*) синхронного двигуна від частоти і напруги

Виконані розрахунки наочно показали дуже несприятливу залежність реактивної потужності від частоти за відсутності автоматичного регулювання збудження: при пониженні частоти на 5% реактивна потужність, що віддається двигуном в мережу, зменшується на 30%.

Висновки до розділу 3:

1. Встановлено, що відхилення частоти, несинусоїдальність, несиметрія та відхилення напруги – значимі фактори впливу на електромеханічні системи із синхронними двигунами.

2. Розглянуто вплив показників якості електроенергії на електромеханічні характеристики синхронних двигунів. Наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливання швидкості в усталеному режимі, а отже - до погіршення енергоефективності роботи електропривода. Встановлено, що відносне значення струму зворотної послідовності знижується при збільшенні тривалості ввімкнення. При пониженні частоти на 5% реактивна потужність, що віддається двигуном в мережу, зменшується на 30%.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ НА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ

4.1 Гармонічний аналіз струмів і напруг вентильних двигунів

Для найбільш достовірної оцінки гармонійного складу електричних величин використовуються електронні гармонійні аналізатори, на вхід яких подаються реальні параметри. Однак з метою виявлення загальних закономірностей проведемо аналітичне дослідження вихідних параметрів перетворювача з урахуванням реальних форм кривих струмів і напруг [38].

Для аналізу приймаємо наступні допущення: падіння напруги на тиристорах перетворювача відсутня; перетворювач зібраний за мостовою схемою і працює без зрівняльних струмів; напруга синусоїдальна з комутаційними провалами і викидами, амплітуда яких дорівнює середньому значенню двох сусідніх напруг, а тривалість визначається кутом комутації; струм змінюється лінійно в процесі комутації, ідеально згладжений, має трапецеїдальну форму, причому напівперіод струму складається з ділянки провідності $120^\circ + \gamma$ і паузи $60^\circ - \gamma$; кут навантаження, будучи внутрішнім параметром СМ, майже не надає впливу на енергетичні характеристики перетворювача, тому розглядається один із законів $\beta = \text{const}$, а для переходу до значень β_0 необхідно скористатися виразом $\beta_0 = \beta + \theta$.

Для визначення гармонійного складу струму статора розкладемо його криву в ряд Фур'є, розміщуючи початок координат в середині ділянки $60^\circ - \gamma$ (рис. 4.1). Оскільки крива симетрична як відносно осі абсцис, так і відносно початку координат, ряд не містить постійної складової, парних гармонік і косинусоїдальних складових. Знаходимо коефіцієнт Фур'є для синусоїдального ряду

$$\begin{aligned}
 b_n = 2 \frac{I_m}{\pi} & \left[\int_{\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2}}^{\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2}} \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{6} + \omega t \right) \sin n \omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2}}^{\frac{5}{6}\pi + \frac{\gamma}{2}} \sin n \omega t d\omega t + \right. \\
 & \left. + \int_{\frac{5}{6}\pi - \frac{\gamma}{2}}^{\frac{5}{6}\pi + \frac{\gamma}{2}} \frac{1}{\gamma} \left(\frac{5}{6}\pi + \frac{\gamma}{2} - \omega t \right) \sin n \omega t d\omega t \right], \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$ - номер гармоніки струму.

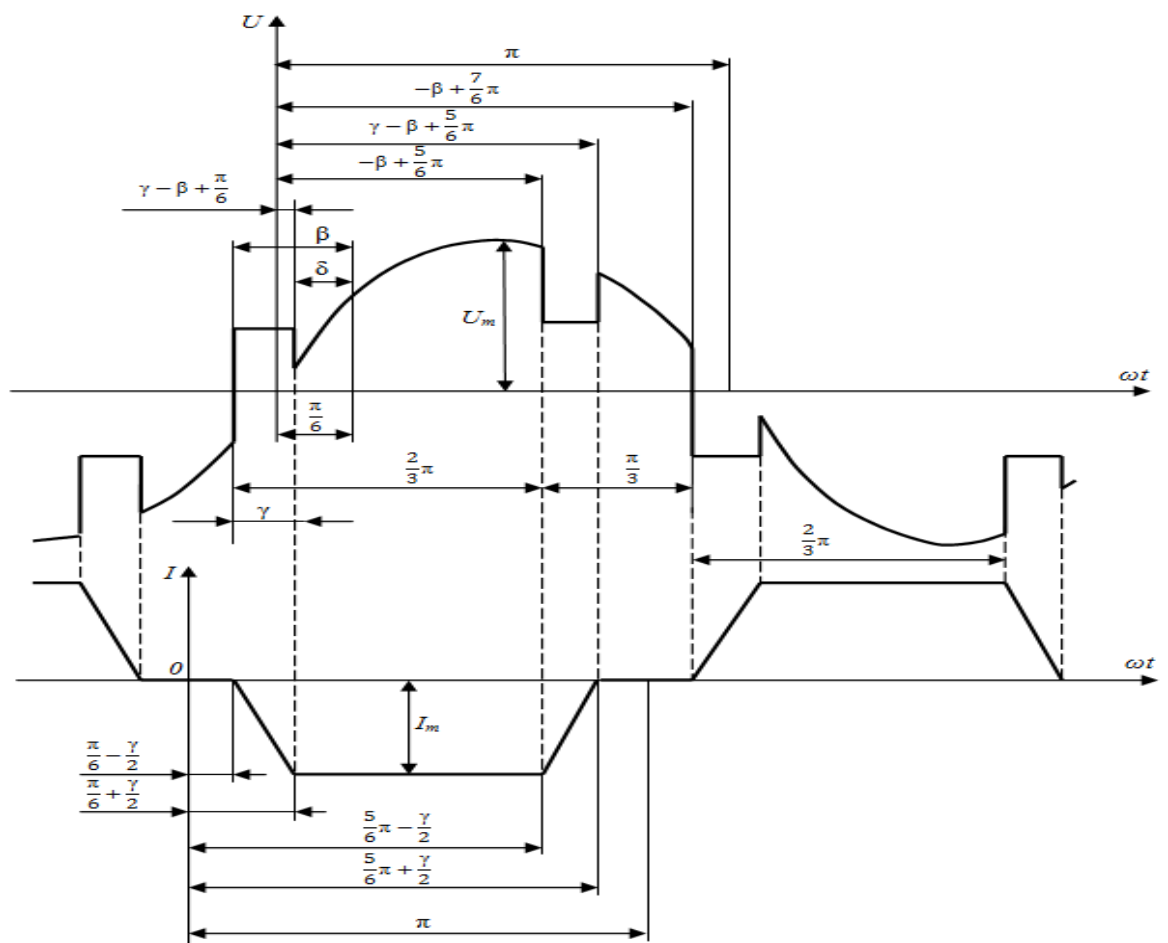


Рисунок 4.1 - Ідеалізовані криві фазної напруги і струму ВД

Інтегруючи вираз (4.1), отримуємо

$$b_n = 8 \frac{I_m}{\pi \gamma} \frac{\sin \frac{\gamma}{2} \sin n \frac{\pi}{2} \sin n \frac{\pi}{3}}{n^2}. \quad (4.2)$$

З формули (4.2) видно, що при $n = 3a$ ($a = 1, 2, 3, \dots$) коефіцієнт дорівнює нулю, тобто в кривій струму відсутні гармоніки кратні 3. Таким чином, струм якоря ВД містить гармоніки порядку $n = 6p \pm 1$ ($p = 0, 1, 2, \dots$), або 1, 5, 7, ...

Враховуючи, що $\sin n \frac{\pi}{2} \sin n \frac{\pi}{3} = \pm \frac{\sqrt{3}}{2}$, записуємо

$$b(6p \pm 1) = \pm I_{m(1)} \frac{\sin(6p \pm 1) \frac{\gamma}{2}}{(6p \pm 1)^2 \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (4.3)$$

де $I_{m(1)} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi \gamma} \sin \frac{\gamma}{2} I_m$ - амплітуда першої гармоніки струму.

Миттєве і дійсне значення струмів мають вигляд

$$i = I_{m(1)} \left[\sin \omega t + \sum_{p=1}^{\infty} \left(\pm \frac{\sin(6p+1) \frac{\gamma}{2}}{(6p+1)^2 \sin \frac{\gamma}{2}} \sin(6p+1)\omega t \right) \right]; \quad (4.4)$$

$$I = I_{(1)} \sqrt{1 + \sum_{p=1}^{\infty} \left(\pm \frac{\sin(6p+1) \frac{\gamma}{2}}{(6p+1)^2 \sin \frac{\gamma}{2}} \right)^2}, \quad (4.5)$$

де $I_{(1)} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi \gamma} \sin \frac{\gamma}{2} I_m$ - діюче значення струму першої гармоніки.

Дослідження за допомогою засобів обчислювальної техніки спектрального складу кривої струму двигуна до 43-го порядку показали, що

явище резонансу відсутнє (рис. 4.2). При цьому максимальне значення амплітуди 1-ї гармоніки складає $1,1 I_m$ ($\gamma = 10^\circ$) і майже не залежить від кута комутації, зменшуючись до 95,5% при $\gamma = 60^\circ$ (рис. 4.3). Амплітуди вищих гармонійних помітно зменшуються зі збільшенням γ , причому ступінь загасання збільшується зі зростанням номера гармоніки.

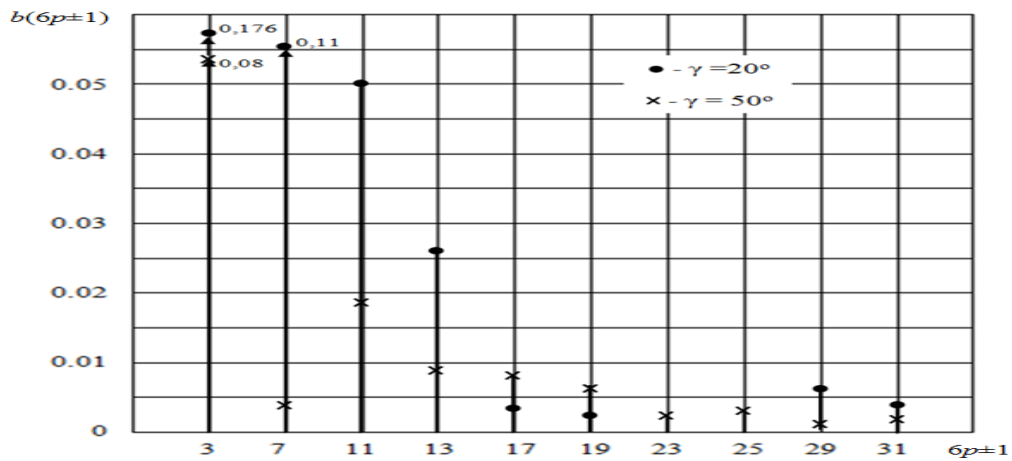


Рисунок 4.2 - Лінійчатий спектр кривої струму ВД

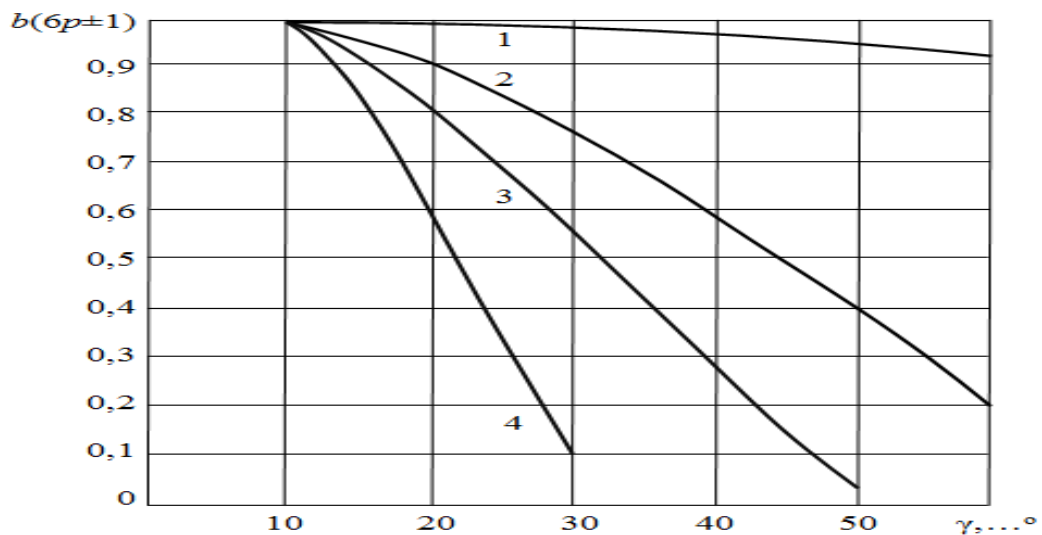


Рисунок 4.3 - Криві, що ілюструють ступінь загасання гармонік струму ВД при збільшенні кута комутації: 1, 2, 3, 4 - відповідно перша, п'ята, сьома і одинадцята гармоніки

В режимі критичних перевантажень приводу ($\gamma = 60^\circ$) форма струму наближається до синусоїдальної, і з вищих гармонік залишається 5-та ($I_m(5) = 0.04I_m$). Як впливає з формули (4.5) і рис. 4.3, діюче значення струму двигунів зменшується зі збільшенням кута комутації і при $\gamma = 60^\circ$ визначається практично величиною 1-й гармоніки. Наведені теоретичні положення добре узгоджуються з експериментом.

Для визначення гармонійного складу вихідної напруги перетворювача приймаємо початок координат в точці перетину кривої напруги з віссю абсцис (рис. 4.1). Оскільки крива має симетрію III роду

$f(x + \pi) = -f(x)$, вона не містить парних гармонік. Знаходимо коефіцієнти Фур'є $a_{(2k+1)}$ і $b_{(2k+1)}$ перед членами ряду, що містять косинуси і синуси

$$a_{(2k+1)} = \frac{2}{\pi} U_m \left[\frac{1}{2} \int_0^{\gamma - \beta + \frac{\pi}{6}} \cos(2k+1)\omega t d\omega t + \int_{\gamma - \beta + \frac{\pi}{6}}^{-\beta + \frac{5}{6}\pi} \sin \omega t \cos(2k+1)\omega t d\omega t + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \int_{-\beta + \frac{\pi}{6}}^{\gamma - \beta + \frac{5}{6}\pi} \cos(2k+1)\omega t d\omega t + \int_{\gamma - \beta + \frac{5}{6}\pi}^{-\beta + \frac{7}{6}\pi} \sin \omega t \cos(2k+1)\omega t d\omega t - \frac{1}{2} \int_{-\beta + \frac{7}{6}\pi}^{\pi} \cos(2k+1)\omega t d\omega t \right];$$

(4.6)

$$b_{(2k+1)} = \frac{2}{\pi} U_m \left[\frac{1}{2} \int_0^{\gamma - \beta + \frac{\pi}{6}} \sin(2k+1)\omega t d\omega t + \int_{\gamma - \beta + \frac{\pi}{6}}^{-\beta + \frac{5}{6}\pi} \sin \omega t \sin(2k+1)\omega t d\omega t + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \int_{-\beta + \frac{\pi}{6}}^{\gamma - \beta + \frac{5}{6}\pi} \sin(2k+1)\omega t d\omega t + \int_{\gamma - \beta + \frac{5}{6}\pi}^{-\beta + \frac{7}{6}\pi} \sin \omega t \sin(2k+1)\omega t d\omega t - \frac{1}{2} \int_{-\beta + \frac{7}{6}\pi}^{\pi} \sin(2k+1)\omega t d\omega t \right],$$

(4.7)

де $k = 0, 1, 2, \dots$

Інтегруючи вирази (4.6) і (4.7), отримуємо

$$a_{(2k+1)} = \frac{2}{\pi} U_m \left[\frac{(-1)^k}{2k+1} \cos(2k+1) \delta \cos(2k+1) \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2k} \cos 2k \beta \cos 2k \frac{\pi}{6} - \right. \\ \left. - \frac{(-1)^k}{2k} \cos 2k \delta \cos 2k \frac{\pi}{3} - \frac{1}{2(k+1)} \cos 2(k+1) \beta \cos 2(k+1) \frac{\pi}{6} + \right. \\ \left. + \frac{(-1)^{k+1}}{2(k+1)} \cos 2(k+1) \delta \cos 2(k+1) \frac{\pi}{3} - \frac{1}{2k+1} \cos(2k+1) \beta \sin(2k+1) \frac{\pi}{6} \right];$$

(4.8)

$$b_{(2k+1)} = \frac{2}{\pi} U_m \left[\frac{(-1)^{k+1}}{2k+1} \sin(2k+1) \delta \cos(2k+1) \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2k+1} \sin(2k+1) \beta \sin(2k+1) \frac{\pi}{6} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2k} \sin 2k \beta \cos 2k \frac{\pi}{6} + \frac{(-1)^{k+1}}{2k} \sin 2k \delta \cos 2k \frac{\pi}{3} - \frac{(-1)^{k+1}}{2(k+1)} \sin 2(k+1) \delta \cos 2(k+1) \frac{\pi}{3} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2k+1} \sin 2(k+1) \beta \cos 2(k+1) \frac{\pi}{6} \right]$$

(4.9)

Миттєве і чинне значення напруги

$$U = U_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_{(1)}) + \sum_{k=1}^{\infty} U_{m(2k+1)} \sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{(2k+1)}]; \quad (4.10)$$

$$U = \sqrt{0.5(U_{m(1)}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{m(2k+1)}^2)},$$

(4.11)

$$\text{де } U_{m(1)} = \sqrt{a_{(1)}^2 + b_{(1)}^2}; \quad U_{m(2k+1)} = \sqrt{a_{(2k+1)}^2 + b_{(2k+1)}^2};$$

$$\varphi_{(1)} = \arctg \frac{b_{(1)}}{a_{(1)}}; \quad \varphi_{(2k+1)} = \arctg \frac{b_{(2k+1)}}{a_{(2k+1)}}.$$

Після тригонометричних перетворень знаходимо чинне значення першої гармоніки напруги

$$U_{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_m \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 \gamma + \sin^2 \frac{\gamma}{2} + \sin \beta \left[\frac{1}{2} \sin \gamma + \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)(1 + \cos \beta)\right] - \sin \delta \left[\frac{1}{2} \sin \gamma + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)(1 + \cos \delta)\right]}.$$

(4.12)

Через громіздкість виразів (4.8), (4.9) розрахунок коефіцієнта гармонійного ряду до 41-го порядку в залежності від кутів β , γ і δ виконуємо за допомогою засобів обчислювальної техніки. Дослідження лінійчатого спектра показали, що спосіб управління комутатором значно впливає на величини амплітуд гармонічних складових.

Так, для $\beta = \text{const}$ при реальних кутах комутації ($\gamma = 20^\circ$) зі збільшенням кута запасу від 10° до 70° амплітуда першої гармоніки зменшується до $0,71 U_m$ (на 27%), а амплітуди вищих гармонійних збільшуються в кілька разів (рис. 4.4, а). При цьому найбільш сильно змінюються амплітуди 3, 7, 9 і 11-ї гармонік, досягаючи значень приблизно $0,5 U_{m(1)}$ і $0,25 U_{m(1)}$. В меншій мірі спектральний склад кривої напруги залежить від кута комутації. У разі $\beta = 60^\circ$ з збільшенням кута комутації амплітуда 1-й гармоніки зменшується від $0,91 U_m$ до $0,84 U_m$, амплітуди 3, 5 і 7-ї гармонік - в два рази.

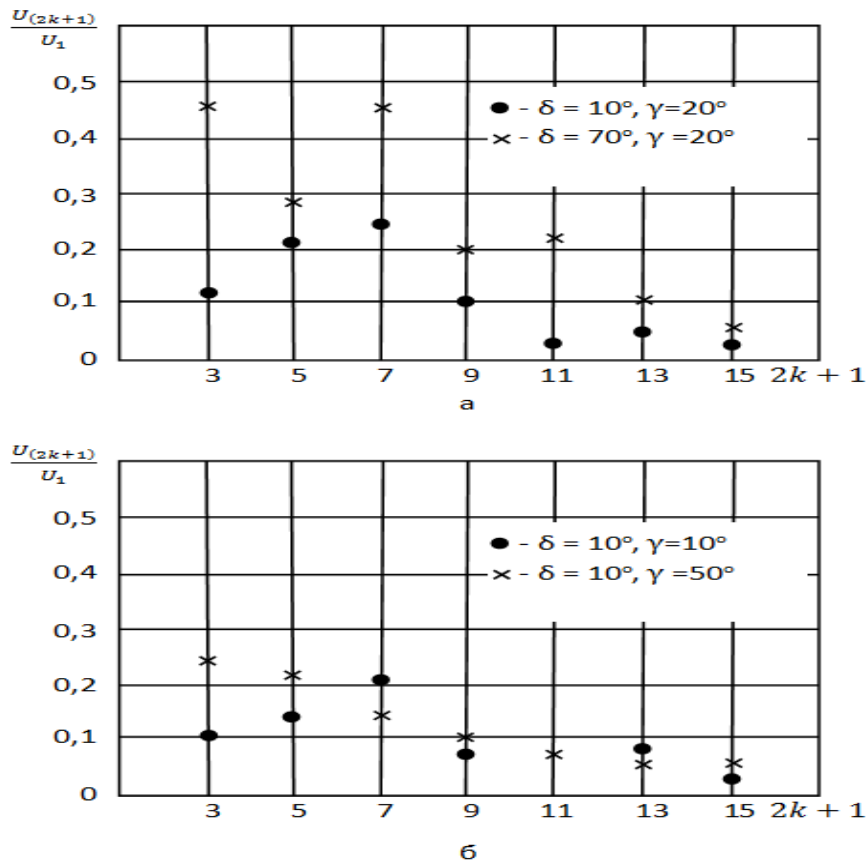


Рисунок 4.4 - Лінійчатий спектр кривої напруги ВД:
 а - $\beta = \text{const}$; б - $\beta_{\min} = f(\gamma)$

Для способу управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\gamma = 10^\circ$ амплітудне значення основної гармоніки складає $0,97 U_m$, а найбільшої 7-ї - $0,22 U_m$ (1) (рис. 4.4, б). В граничному режимі амплітуда 1-ї гармоніки зменшується на 15%, 3-ї і 5-ї не перевищує $0,23 U_m$ (1), 7-ї - $0,15 U_m$ (1) і 9-ї - $0,1 U_m$ (1) .

Для полегшення інженерних розрахунків рекомендовані значення коефіцієнтів зв'язку в залежності від прийнятого закону управління і кутів β , γ і δ представлені в табл. 1 дод. Оскільки коефіцієнти наведені у відносних одиницях, їх можна використовувати для ВД будь-яких потужностей і частот обертання.

Проведений гармонійний аналіз вказує на доцільність при розробці ВД створювати системи управління з використанням способу $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta_{\min} = \text{const}$, оскільки невиправдане збільшення кута запасу при $\beta = \text{const}$ приводить до різкого зменшення 1-ї гармоніки напруги і збільшення амплітуд вищих

гармонійних, що роблять шкідливий вплив на джерело енергії та електропривод [39].

4.2 Оцінка якості перетворення енергії перетворювачами вентильних двигунів

Одним із критеріїв вибору типу регульованого електроприводу є якість перетворення електричної енергії, що характеризується величинами вихідних струмів і напруг, їх гармонійним складом і енергетичними показниками системи. З цією метою розробимо методику розрахунку показників якості перетворювача енергії ВД і проаналізуємо їх [40].

Зв'язок між амплітудним I_m , середнім I_d та дійсним за половину періоду значеннями струму визначається коефіцієнтами форми K_Φ і амплітуди K_A [41] обчислюваними за відомими формулами

$$K_\Phi = \frac{I}{I_d}; \quad K_A = \frac{I_m}{I}, \quad (4.13)$$

$$\text{де } I_d = \frac{2}{3} I_m.$$

Гармонійний склад струму якоря двигуна характеризується коефіцієнтами

$$K_\Pi = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm1)}^2}; \quad K_{\text{И}} = \frac{I_{(1)}}{I}; \quad (4.14)$$

$$K_\Gamma = \frac{1}{I_{(1)}} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm1)}^2}; \quad i^* = \frac{1}{K_{\text{И}}},$$

де K_{Π} , K_I , K_{Γ} - коефіцієнти відповідно пульсації, спотворення і гармонік; i^* - відносна величина діючого значення струму; $I_{(1)}$ і $I_{(6p \pm 1)}$ - діючі значення 1-ї та вищих гармонік струму.

Значення коефіцієнтів K_{ϕ} , K_A , K_{Π} , K_I , K_{Γ} , i^* для різних кутів комутації, обчислені на ЕОМ за формулами (4.13) і (4.14) при обліку гармонік струму від 1-ї до 43-ї, наведені в чисельнику умовної дробу табл. 2 дод. Аналіз таблиці показує, що зі збільшенням навантаження двигуна коефіцієнти форми, амплітуди і гармонійні коефіцієнти прагнуть до значень, характерним для синусоїдального струму.

Для інженерних розрахунків орієнтовною оцінкою якості перетворення енергії тиристорними перетворювачами показники струму K_{ϕ} , K_A , K_{Π} , K_I , K_{Γ} , i^* досить визначити з урахуванням основної і декількох перших гармонік. Тоді для них записуємо такі вирази

$$K_{\phi} = \frac{3\sqrt{6} \sin \frac{\gamma}{2}}{\pi \gamma}; \quad K_A = \frac{\pi \gamma}{2\sqrt{6} \sin \frac{\gamma}{2}}; \quad K_{\Pi} = \frac{0.1}{\gamma} \sin 5 \frac{\gamma}{2};$$

$$K_I = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\gamma}{2} + 0,01 \sin^2 5 \frac{\gamma}{2}}}; \quad K_{\Gamma} = 0.045 \frac{\sin 5 \frac{\gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (4.15)$$

Правомірність такого підходу підтверджується порівнянням чисельника і знаменника умовної дробу (табл. 2 дод.), в знаменника якій наведено ті ж коефіцієнти, обчислені за формулами (4.15). Похибка, що допускається при такому розрахунку, не перевищує в середньому 5-10%, що цілком задовольняє цілям орієнтовної оцінки.

Показники, що характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонійний склад, перебувають у складній функціональній залежності від способу управління ВД, а також кутів випередження, комутації та запасу. Отримати аналітичні залежності для них зважаючи на громіздкість виразів діючих значень 1-ї гармоніки $U_{(1)}$, вищих гармонійних $U_{(2k+1)}$ і напруги U не є можливим. Тому з метою полегшення інженерних розрахунків рекомендовані

значення коефіцієнтів, розраховані з урахуванням гармонік напруги від 1-ї до 41-ї на ЕОМ за формулами

$$K'_{\phi} = \frac{U}{U_{\phi}}; \quad K'_A = \frac{U_m}{U};$$

$$K'_{\Pi} = \frac{1}{U_d} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad K'_{\text{И}} = \frac{U_{(1)}}{U}; \quad (4.16)$$

$$K'_{\Gamma} = \frac{1}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad U^* = \frac{1}{K'_{\text{И}}},$$

де $U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma}{2}$, представлені в табл. 3 дод.

Як видно з таблиці, показники якості напруги погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. При цьому для закону управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$ характерні значно вищі показники, ніж для $\beta = \text{const}$ (рис. 4.5). Невиправдане збільшення кута запасу призводить до збільшення коефіцієнтів, що характеризують змінну складову напруги K_{Π} , K_{Γ} і зменшення коефіцієнта спотворення, що особливо проявляється в номінальному режимі роботи приводу ($\gamma \approx 20$). Порівняння табл.3 дод. з опублікованими даними [61, табл. 2] показує, що для реальних кутів комутації і закону $\beta_{\min} = f(\gamma)$ показники якості на-напруги ВД вище показників ЧРП з асинхронними машинами.

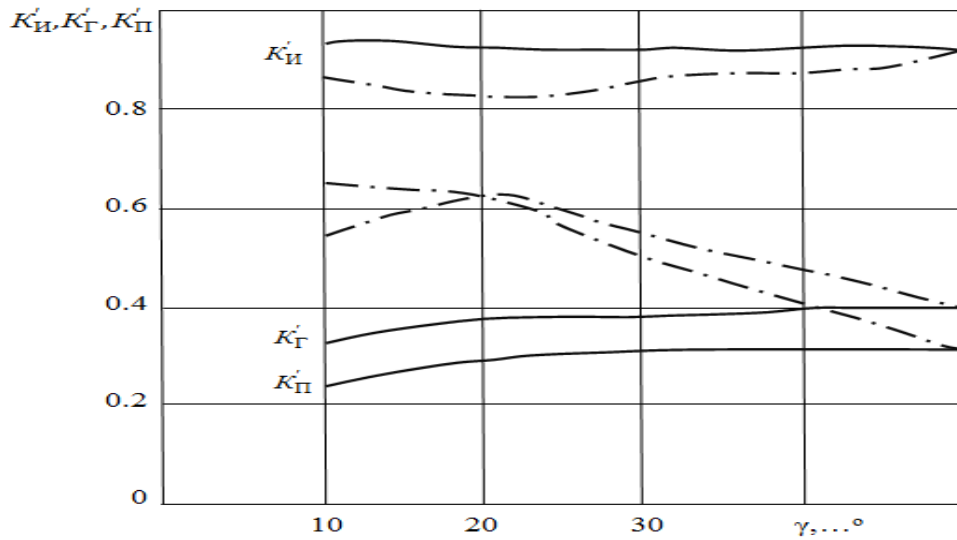


Рисунок 4.5 - Криві, що ілюструють характер зміни коефіцієнтів K_I , K_G , K_P ,
 $(-\beta_{\min}f(\gamma)$ при $\delta = 10^\circ$; $- \bullet - \beta = 60^\circ = \text{const})$

ВД можна представити у вигляді ряду еквівалентних машин змінного струму з загальним валом [14,42]. Для основної гармоніки еквівалентним двигуном є реальна СМ, а для вищих гармонік еквівалентними будуть асинхронні, включені на напруги своєї частоти з параметрами, відповідними частоті вищої гармоніки. Тому будемо вважати, що корисною потужністю до ВД є не сумарна активна потужність P_Σ , а потужність $P_{(1)}$ від перших гармонік напруги та струму.

Перетворення енергії в ВД, як і в ЧРП [43-46], характеризується коефіцієнтами відносної потужності p^* , корисного використання споживаної потужності C_Π і термічним коефіцієнтом перевантаження C_t , обчислюється за формулою

$$p^* = \frac{P_\Sigma}{P_{(1)}}; C_\Pi = \frac{1}{p^*}; C_t = 1 + \frac{\sum_{k>1}^{\infty} p(k)}{\Sigma p}, \quad (4.17)$$

де $P_{\Sigma} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} UI_m \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma}{2}$; $P_{(1)} = 3U_{(1)}I_{(1)} \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})$; Σp - сума втрат в меді і сталі СМ; $\sum_{k>1}^{\infty} p_{(k)}$ - додаткові втрати від вищих гармонійних.

Оскільки в кожній фазі машини в ВД за один оборот вала струм протікає протягом $2(\frac{2}{3}\pi + \gamma)$, то статорні обмотки використовуються гірше, ніж у звичайній СМ. Тому при заданому моменті обертання фазні обмотки машини будуть нагріватися сильніше, тобто ККД привода

$$\eta_{ВД} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma p}{P_M \chi}} = \frac{\eta_c \chi}{\eta_c (\chi - 1) + 1} \quad (4.18)$$

знизиться [47]. Тут η_c , χ - відповідно ККД СМ і коефіцієнт використання ВД; P_M - механічна потужність. Коефіцієнт використання отримуємо з виразу потужності ВД

$$\chi = \frac{\gamma}{2} \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}. \quad (4.19)$$

Несинусоїдальність живлення призводить до необхідності підвищення габаритної потужності СМ, яке можна врахувати коефіцієнтом габаритної потужності [46]

$$C_{\Gamma} = \sqrt{1 + \frac{p^* - 1}{1 - \eta_c}}. \quad (4.20)$$

Повна потужність СМ визначається трьома складовими, які знаходимо за допомогою інтегральних методів [48,49]

$$\begin{aligned}
 S_{\text{CM}} &= \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\text{CM}}^2 + P_{\text{И}}^2} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi K_{\text{И}}} UI_m; \\
 Q_{\text{CM}} &= P_{\Sigma} \operatorname{tg}(\beta - \frac{\gamma}{2}); \\
 P_{\text{И}} &= \sqrt{(\frac{1}{K_{\text{И}}^2} - 1)(P_{\Sigma}^2 + Q_{\text{CM}}^2)} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} UI_m \sqrt{\frac{1}{K_{\text{И}}^2} - 1},
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

де $Q_{\text{CM}}, P_{\text{И}}$ - відповідно реактивна потужність і потужність викривлення СМ.

Коефіцієнт потужності на затискачах статора СМ

$$K_{\text{Р}} = \frac{P_{(1)}}{S_{\text{CM}}} = K_{\text{И}} K_{\text{СД}} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}},
 \tag{4.22}$$

де $K_{\text{СД}} = \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})$ - коефіцієнт зсуву двигуна; $\sin \frac{\gamma}{2} / \frac{\gamma}{2}$ - величина, що враховує допущення $U_{(1)} \approx U$.

Коефіцієнти $p^*, C_{\text{П}}, C_{\text{т}}, \chi, \eta_{\text{ВД}}, C_{\text{Г}}, K_{\text{СД}}$ і $K_{\text{Р}}$, розраховані для $\eta_{\text{С}} = 0,936$ на ЕОМ за формулами (4.17) - (4.22), наведено в табл. 4 дод., з якої випливає, що збільшення кута випередження призводить до погіршення якості перетворення енергії в ВД. Це відбувається через збільшення реактивної потужності, а також внаслідок більшого зменшення корисної активної потужності в порівнянні з сумарною. При цьому повна потужність і потужність викривлення майже постійні.

У випадку, коли система управління задає фіксований кут β , то зі зменшенням кута запасу сумарна активна потужність майже не змінюється, корисна потужність зростає, а повна, реактивна і потужність викривлення зменшуються. При законі управління $\beta_{\text{min}} = f(\gamma)$ із збільшенням кута комутації

активна потужність, потужність спотворення і повна потужність зменшуються, а реактивна збільшується.

На рис. 4.6-4.9 представлені параметри C_{Π} , $\eta_{ВД}$, $K_{СД}$ і $K_{Р}$ в залежності від кутових величин до способу управління, з яких видно, що так само, як і показники напруги, показники перетворення потужності значно вище для способу управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$, ніж для $\beta = \text{const}$. Так, наприклад, для $\beta = 60^\circ$ при $\gamma = 20^\circ$ коефіцієнти мають наступні значення: $p^* = 1.193$; $C_{\Pi} = 0,838$; $C_t = 4$; $\chi = 0,636$; $\eta_{ВД} = 0,903$; $C_{Г} = 2$; $K_{СД} = 0,6428$; $K_{Р} = 0,63$. Для закону $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta = 10^\circ$ і $\gamma = 20^\circ$ ці величини такі: $p^* = 1,06$; $C_{\Pi} = 0,943$; $C_t = 1,958$; $\chi = 0,93$; $\eta_{ВД} = 0,932$; $C_{Г} = 1,392$; $K_{СД} = 0,94$; $K_{Р} = 0,919$. Але ці значення не є максимально можливими. При $\gamma \approx 20^\circ$ і малому часу відновлення вентилів коефіцієнти p^* , C_{Π} , χ , $K_{СД}$, $K_{Р}$ близькі до одиниці, а $\eta_{ВД} \approx \eta_{С}$.

Порівняння табл. 4 дод. з опублікованими даними [61, табл. 4] показує, що для реальних кутів комутації і способу $\beta_{\min} = f(\gamma)$ показники якості потужності ВД вище аналогічних показників ЧРП. Зазначений спосіб управління відповідає роботі машини з коефіцієнтом зсуву, близьким до одиниці. Кут зсуву в цьому випадку завжди визначає мінімальну величину реактивної потужності. Розрахунки показують, що при $\beta_{\min} = f(\gamma)$ втрати в ВД від вищих гармонійних невеликі ($\sum_{k>1}^{\infty} p(k) = (0.1 - 1) \sum p$) і можуть бути зменшені за рахунок збільшення індуктивності згладжує дроселя.

Отримані результати дозволять розробнику при виборі електроприводу та мінімізації встановленої потужності устаткування досить просто і з високою точністю врахувати вплив параметрів комутатора, машини і способи управління на якість перетворення енергії в ВД.

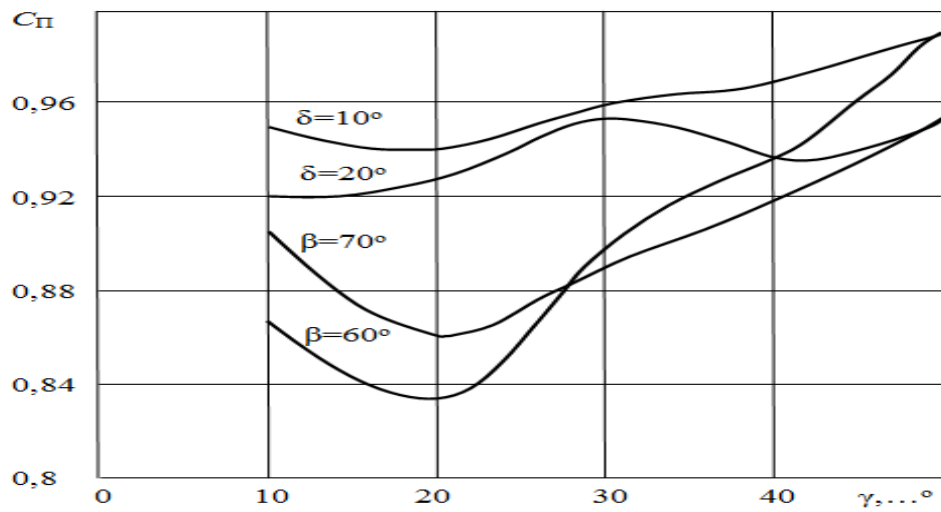


Рисунок 4.6- Залежності коефіцієнта корисного використання споживаної потужності від кутових параметрів ВД і способів управління

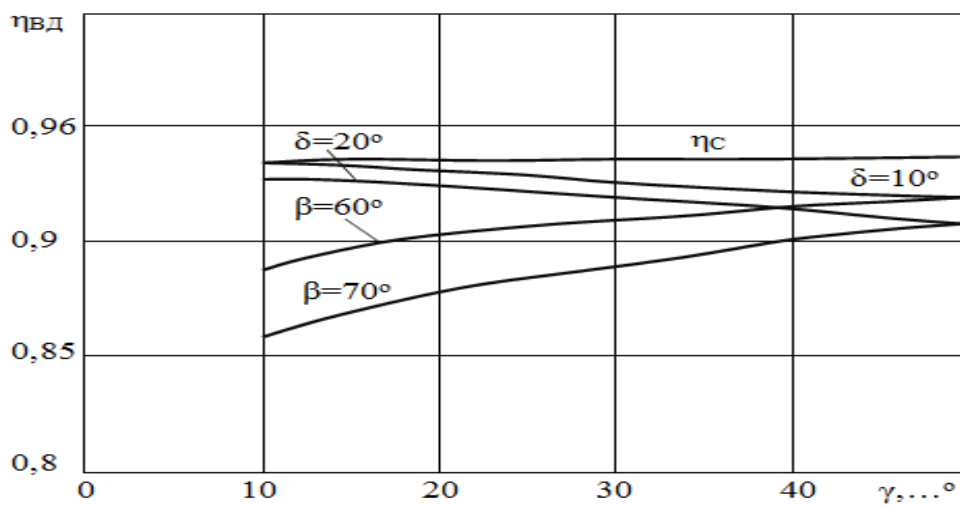


Рисунок 4.7 - Залежності ККД від кутових параметрів ВД і способів управління

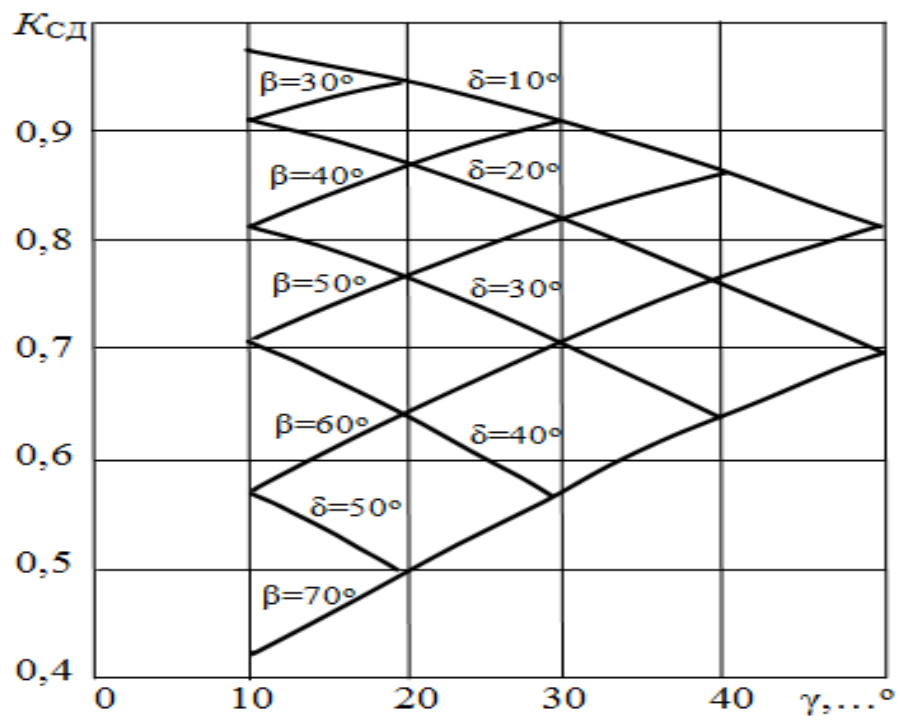


Рисунок 4.8- Залежності коефіцієнта зсуву від кутових параметрів ВД і способів управління

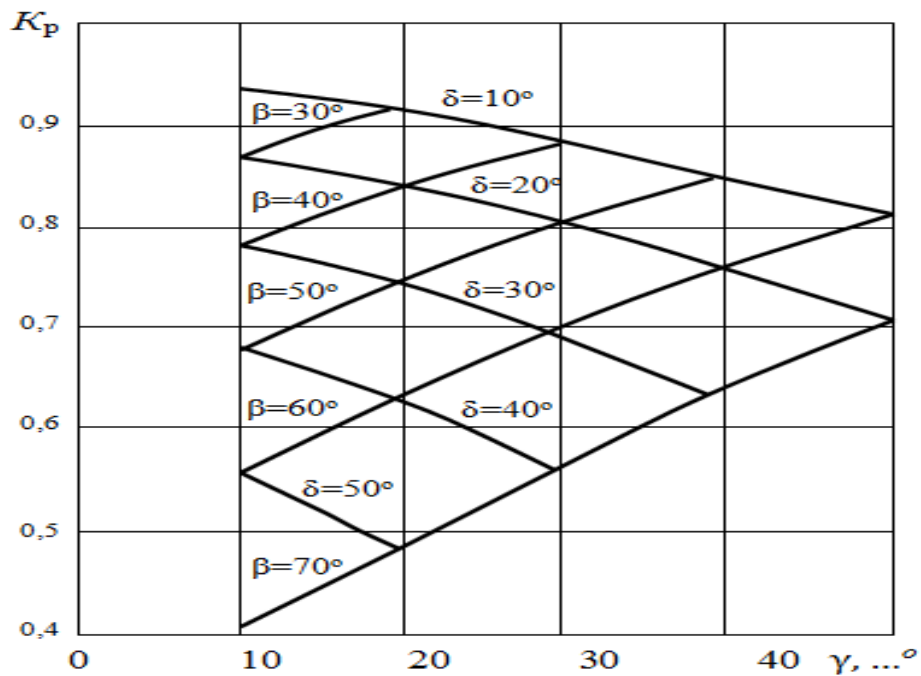


Рисунок 4.9- Залежності коефіцієнта потужності від кутових параметрів ВД і способів управління

4.3 Вибір силового електрообладнання електроприводу з вентильними двигунами

Регулювання продуктивності промислових механізмів зміною частоти обертання приводу призводить до суттєвого підвищення техніко-економічних показників установки. Тому важливе значення має мінімізація встановленої потужності силового електрообладнання ВД [50]. Встановлена потужність обладнання ВД визначається технологічними вимогами і залежить від структури перетворювача, а також від виду комутації вентилів і способу управління комутатором [51-53].

Застосування залежних інверторів струму погіршує використання СМ (рис. 3.9, табл. 4 дод.), але призводить до спрощення комутатора за рахунок виключення пристроїв штучної і примусової комутації. У табл.4.1 наведені розрахункові дані щодо вибору СМ і тиристорного перетворювача в залежності від закону управління ($\beta = 60^\circ$, $\beta = 5^\circ$, $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta = 10^\circ$) при заданій потужності на валу приводу $P_3 = 3$ кВт.

Потужність електричної машини в ВД за умови рівності перших гармонік несинусоїдних і синусоїдальних напруг і струмів визначається коефіцієнтом габаритної потужності. Максимуму залежності $C_{\Gamma\max} = f(\beta, \gamma)$ (рис. 3.11, табл. 4 дод.) відповідає найбільша розрахункова потужність СМ.

Тиристорний перетворювач вибирається за номінальним струмом

I_H і напрузі U_H двигуна. Для реального діапазону зміни кутів комутації з графіків рис. 3.12 або табл. 4 дод. знаходимо середнє значення коефіцієнта зсуву K_{CD} , а також визначаємо I_H і $I_{d\max}$

$$I_H = \frac{P_3 C_{\Gamma\max}}{\sqrt{3} U_H K_{CD}}; \quad (4.23)$$

$$I_{d\max} \approx I_m = \frac{\pi \gamma I_H}{2\sqrt{6} \sin \frac{\gamma}{2}}.$$

Таблиця 4.1

Розрахункові дані для вибору СМ і комутатора ВД

Параметри	$\beta = 60^\circ$	$\beta = 50^\circ$	$\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta_{\min} = 10^\circ$
P_3 , кВт	3	3	3
n_H , об/хв	1000	1000	1000
$C_{\Gamma\max}$	2,004	1,781	1,392
P_H , кВт	6,24	5,4	4,2
U_H , В	400	400	400
K_{CD}	0,68	0,79	1
I_H , А	13,3	11,35	9,01
$I_{d\max}$, А	4,47	4,13	3,68
$U_{d\max}$, В	540	540	540
U_T , В	400	400	400
$Q_{всн}$	8	8	8
$T_{всн}$	1	1	1
$I_{d\max} U_{d\max}$, кВА	2413,8	2230,2	1987,2

Для мостових трифазних схем максимальна величина середнього значення випрямленої напруги $U_{d\max}$, номінальна лінійна напруга двигуна U_H і лінійна напруга мережі (або вторинної обмотки трансформатора U_T) пов'язані наступним чином

$$\frac{U_{d\max}}{U_H} = \frac{U_{d\max}}{U_T} = 1.35. \quad (4.24)$$

Число послідовно включених вентилів у плечі моста

$$Q_{всн} \geq \frac{U_{d\max}}{U_{обр.всн}}, \quad (4.25)$$

число паралельних гілок

$$T_{\text{всн}} \geq \frac{I_{d \max}}{3I_{d\text{всн}}}, \quad (4.26)$$

а також тип і параметри тиристорів вибираються (з урахуванням запасу по напрузі і струму) залежно від допустимих значень зворотної напруги $U_{\text{обр.всн}}$ і середнього значення випрямленої струму $I_{d\text{всн}}$ вентиля. З табл. 4.1 видно, що потужності електричної машини і тиристорного перетворювача з машинною комутацією при $\beta_{\min} = f(\gamma)$ значно нижче, ніж при $\beta = \text{const}$.

З метою зменшення впливу перетворювача на мережу і узгодження вхідної напруги системи з напругою живлення в деяких випадках може виникнути необхідність в узгоджувальний трансформатор і пристрої компенсації реактивної потужності. На величину потужності цих пристроїв впливає характер навантаження двигуна, спосіб управління і діапазон зміни швидкості.

Регулювання напруги випрямляча може бути симетричним і несиметричним [53,54,55]. Відомо багато способів несиметричного регулювання [56,57], серед яких найбільш доцільним є почергове [58]. При почерговому управлінні у трифазній мостовій схемі створюється штучний нульової контур, в результаті чого тривалість протікання струму по вторинних обмотках трансформатора стає менше $2/3$ напівперіоду живлячої напруги. Крім цього, підвищуються також деякі енергетичні показники, зокрема зменшується споживання реактивної потужності, збільшуються коефіцієнти зсуву та потужності [59].

Симетричне управління групами вентилів випрямляча характеризується тим, що кути управління α_1 і α_2 рівні і змінюються в межах $0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{\min}$. При

"першому" способі $\alpha_{1\min}^I = 0$, $\frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^I \leq \pi - \beta_{\min}$, при "другому" $\alpha_{1\min}^{II} = \frac{\pi}{6}$,

$$\frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^{II} \leq \pi - \beta_{\min}.$$

Для вентиляторних установок залежність статичного моменту від швидкості [60]

$$M_c = M_{c\max} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2. \quad (4.27)$$

Аналітичне вираження електромагнітного моменту ВД за умови нехтування активним опором має вигляд [14]

$$M = \frac{3}{2} P \frac{U_{m(1)}^2 \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \sin \theta}{\omega^2 L_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2})}. \quad (4.28)$$

З урахуванням максимального значення моменту [14]

$$M = \frac{3}{2} P \frac{U_{m(1)}^2 \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}{4\omega r} \quad (4.29)$$

рівняння (4.28) запишемо наступним чином

$$M = M_{\max} \frac{4r \sin \theta}{\omega L_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}. \quad (4.30)$$

Вирішуючи рівняння (4.27) і (4.30), знаходимо

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \frac{4r \sin \theta}{\mu x_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1},$$

(4.31)

де $\mu = \frac{M_{\text{сmax}}}{M_{\text{max}}}.$

Нехтуючи падінням напруги на вентилях, і вважаючи, що механічні характеристики ВД є абсолютно жорсткими, з рівняння $\omega_{po} = \frac{k_{cx.B} \cdot U_c \cos \alpha}{k_{cx.I} \cdot E \cos \beta}$ отримуємо

$$\frac{\omega}{\omega_0} = v \cos \alpha;$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 0.5v(1 + \cos \alpha_2^I);$$

(4.32)

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 0.5v\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{II}\right),$$

де $v = \frac{K_{\text{CX.B}} U_m}{K_{\text{CX.I}} E \cos \beta}.$

Вирішуючи спільно рівняння (4.31) і (4.32), визначаємо

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}}; \\ \alpha_2^I &= \arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - 1); \\ \alpha_2^{II} &= \arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2}), \end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\text{де } G = \frac{4r \sin \theta}{v^2 \mu x_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}.$$

Вирази (4.33) дозволяють знаходити кути управління залежно від швидкості і внутрішніх параметрів ВД з похибкою, що не перевищує 3%.

На підставі рівності $M = k_m I_d$ рівняння (4.27) записуємо у вигляді

$$I_d = I_{d \max} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2. \quad (4.34)$$

Тоді діюче значення вторинного струму трансформатора в залежності від способу управління визначаємо наступним чином [56]

$$\begin{aligned} I_T &= I_d \sqrt{\frac{2}{3}} = I_{d \max} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \sqrt{\frac{2}{3}}; \\ I_T^I &= I_{d \max} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}} \\ I_T^I &= I_{d \max} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi - \alpha_{1 \min}^I - \alpha_2^{II}}{\pi}}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Привод вентиляторних установок зазвичай працює в випрямному режимі, а діапазон регулювання швидкості не перевищує 2:1, тому спільне рішення рівнянь (4.32) і (4.35) дозволяє отримати

$$\begin{aligned} I_T &= I_{d \max} F(\alpha); \\ I_T^I &= I_{d \max} F_I(\alpha_2^I); \\ I_T^{II} &= I_{d \max} F_{II}(\alpha_2^{II}), \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\text{где } F(\alpha) = v^2 \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad F_I(\alpha_2^I) = \frac{v^2}{4} (1 + \cos^2 \alpha_2^I)^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}};$$

$$F_{II}(\alpha_2^{II}) = \frac{v^2}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos^2 \alpha_2^{II} \right)^2 \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{II}}{\pi}}.$$

Або, підставляючи у вирази (4.36) значення α , α_2^I и α_2^{II} із виразів (4.33), знаходимо

$$I_T = I_{d\max} F\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right);$$

$$I_T^I = I_{d\max} F_I\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right);$$

(4.37)

$$I_T^I = I_{d\max} F_{II}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

$$\text{де } F\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = v^2 \cos^2 \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$F_I\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \frac{v^2}{4} [1 + (2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1)]^2 \sqrt{1 - [\arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1)]/\pi};$$

$$F_{II}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \frac{v^2}{4} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + (2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2}) \right]^2 \sqrt{\frac{5}{6} - [\arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2})]/\pi}$$

.

Вирази (4.36) і (4.37) мають сенс для кутів

$$0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{\min};$$

$$\alpha_{I\min}^I = 0; \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^I \leq \frac{2}{3}\pi;$$

(4.38)

$$\alpha_{1\min}'' = \frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2'' \leq \frac{2}{3}\pi.$$

Найбільшому чинному значенням струму I_T , що визначає розрахункову потужність трансформатора, відповідає максимум функцій $F(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2^I)$, $F_{Im}(\alpha_2'')$ або $F_m(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$. Причому функції $F(\alpha)$, $F_I(\alpha_2^I)$ і $F_{Im}(\alpha_2'')$ дозволяють визначити величину вторинного струму трансформатора в залежності від кутів управління, а $F(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_I(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$ - від швидкості і внутрішніх параметрів машини.

З виразів (4.36) видно, що максимуму функцій $F_m(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2^I)$, $F_{Im}(\alpha_2'')$ відповідають, кути управління $\alpha = 0$ і $\alpha_2^I = \alpha_2'' = 30^\circ$. Для реальних параметрів ВД ($\beta_0 = 60^\circ$, $\beta = 40^\circ$ - 45° , $\gamma = 15^\circ$ - 20° , $\theta = 15^\circ$ - 20° , $x_d = 1$ - $1,2$) маємо $F_m(\alpha) = 0,817$, $F_{Im}(\alpha_2^I) = 0,711$ і $F_{Im}(\alpha_2'') = 0,612$. Потужність узгоджувального трансформатора при симетричному управлінні складе

$$S_T = \sqrt{3} U_m I_{d\max} [F_m(\alpha) \text{ или } F_m(G, \frac{\omega}{\omega_0})] = 4492 \text{ кВА}, \quad (4.39)$$

що значно вище потужностей трансформаторів, отриманих при почергових способах ($SI_T = 3,9 \text{ кВА}$; $SII_T = 3,3 \text{ кВА}$).

Повну потужність ВД знаходимо на основі інтегральних методів

$$S_1 = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2 + P_{и.т}^2}. \quad (4.40)$$

Остаточні вирази для активної потужності

$$\begin{aligned}
P_{\text{T}} &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}v^2\cos^3\alpha\sqrt{\frac{2}{3}}; \\
P_{\text{T}}' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\frac{v^2}{8}(1+\cos\alpha_2')^3\sqrt{1-\frac{\alpha_2'}{\pi}}; \\
(4.41) \\
P_{\text{T}}'' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\frac{v^2}{8}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+\cos\alpha_2''\right)^3\sqrt{\frac{5}{6}-\frac{\alpha_2''}{\pi}},
\end{aligned}$$

і потужності спотворень

$$\begin{aligned}
P_{\text{И.Т}} &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}v^2\cos^3\alpha\sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{1}{K_{\text{И}}^2}-1\right)}; \\
P_{\text{И.Т}}' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\frac{v^2}{4\sqrt{2}}(1+\cos\alpha_2')2.5\sqrt{\left(1-\frac{\alpha_2'}{\pi}\right)\left(\frac{1}{K_{\text{И}}^2}-1\right)}; \\
(4.42) \\
P_{\text{И.Т}}'' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\frac{v^2}{4\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+\cos\alpha_2''\right)^2\sqrt{\left(\frac{5}{6}-\frac{\alpha_2''}{\pi}\right)\left(\frac{1}{K_{\text{И}}^2}-1\right)(1.75+\sqrt{3}\cos\alpha_2'')}.
\end{aligned}$$

Споживана з мережі реактивна потужність залежить як від способу управління тиристорами, так і від діапазону регулювання

$$\begin{aligned}
Q_{\text{T}} &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\left[F'(\alpha)\text{или}F'\left(G,\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]; \\
Q_{\text{T}}' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\left[F_I'(\alpha_2')\text{или}F_I'\left(G,\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]; \\
(4.43) \\
Q_{\text{T}}'' &= \sqrt{3}U_{\text{T}}I_{d\text{max}}\left[F_{\text{II}}'(\alpha_2'')\text{или}F_{\text{II}}'\left(G,\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right],
\end{aligned}$$

$$\text{де } F'(\alpha) = v^2\cos^2\alpha\sin\alpha\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$F'(G, \frac{\omega}{\omega_o}) = v^2 \cos^2 \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} \sin \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$F'_I(\alpha_2^I) = \frac{v^2}{8} (1 + \cos \alpha_2^I)^2 \sin \alpha_2^I \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}};$$

$$F'_I(G, \frac{\omega}{\omega_o}) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1} \sin \arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} - 1 \right) \times$$

$$\times \sqrt{1 - \left[\arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} - 1 \right) \right] / \pi};$$

$$F'_{II}(\alpha_2^{II}) = \frac{v^2}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{II} \right)^2 \sin \alpha_2^{II} \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{II}}{\pi}};$$

$$F'_{II}(G, \frac{\omega}{\omega_o}) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1} \sin \arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times$$

$$\times \sqrt{\frac{5}{6} - \left[\arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] / \pi}.$$

Вирази (4.41) - (4.43) мають сенс у разі дотримання умов (4.38).

Потужність статичних конденсаторів визначається максимальним значенням реактивної потужності, споживаної приводом, якому, в свою чергу, відповідає максимум функцій $F'_m(\alpha)$, $F'_{Im}(\alpha_2^I)$, $F'_{IIIm}(\alpha_2^{II})$ або $F'_m(G, \frac{\omega}{\omega_o})$,

$F'_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_o})$, $F'_{IIIm}(G, \frac{\omega}{\omega_o})$. Для розглянутого прикладу на рис. 4.10 наведені

розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F'_{II}(\alpha_2^{II})$ і реактивної потужності, що споживається ВД при симетричному і почергових способах управління.

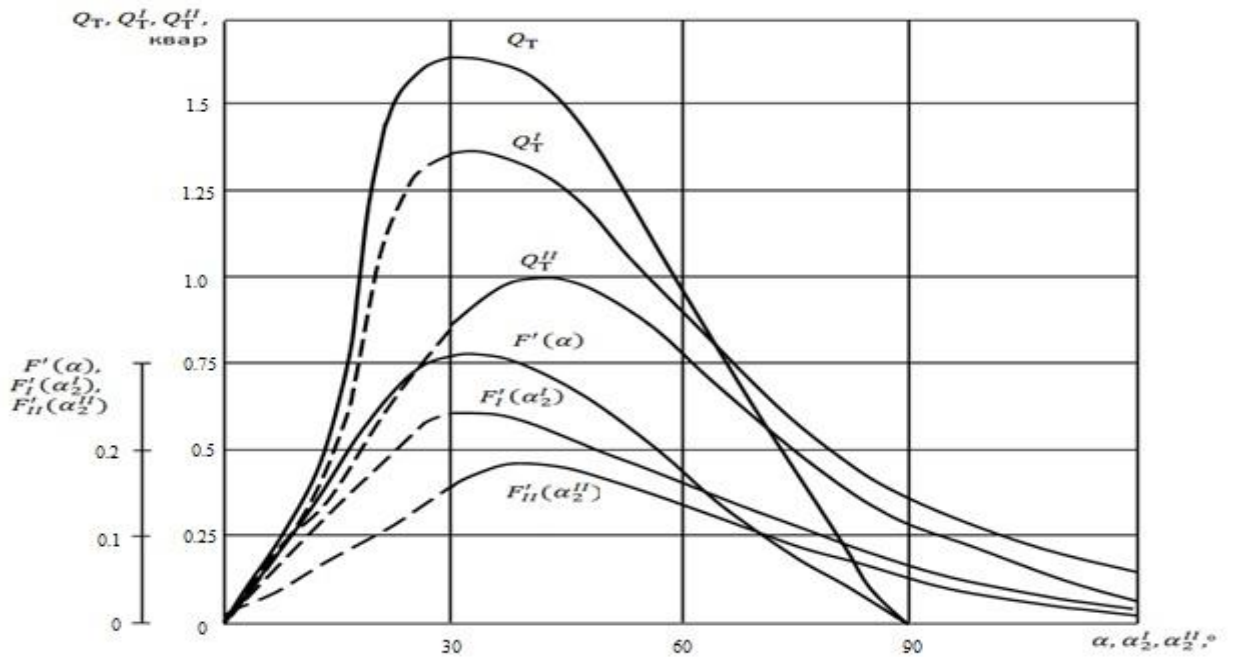


Рисунок 4.10 - Розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F''_{II}(\alpha_2^{II})$ реактивної потужності ВД при симетричному і почерговому способах управління

З графіків знаходимо потужності статичних конденсаторів $Q_K = 1,6$ квар; $Q_K^I = 1,3$ квар; $Q_K^{II} = 1$ квар.

Таким чином, застосування "другого" почергового способу управління тиристорами випрямляча ВД установок з вентиляторним моментом навантаження дозволяє отримати найменші значення потужності узгоджувального трансформатора та статичних конденсаторів. "Перший" почерговий спосіб, хоча й характеризується більш високим значенням встановленої потужності устаткування, проте дозволяє використати в одній групі випрямляча некеровані вентиля і спростити систему управління.

Висновки до розділу 4:

1. З'ясовано, що показники якості потужності погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. При цьому для закону управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$ характерні більш високі показники, ніж для $\beta = \text{const}$. Невиправдане збільшення кута запасу призводить до зростання коефіцієнтів, що

характеризують змінну складову напруги, що особливо проявляється в номінальному режимі роботи приводу.

З'ясовано, що для реальних кутів комутації і закону управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta_{\min} = \text{const}$ показники якості напруги і потужності не гірше кращих показників ЧРП.

3. Встановлено, що оптимальним режимом ВД, при якому забезпечується найбільша величина коефіцієнта потужності СМ і найкращі енергетичні показники, є робота приводу з кутом випередження $\beta_{\min} = f(\gamma)$. При реальних кутах комутації і малому часу відновлення клапанів коефіцієнт потужності прагне до одиниці, а $\eta_{\text{ВД}} \approx \eta_{\text{С}}$.

4. Показано, що потужності електричної машини і вентильного перетворювача з машинною комутацією значно нижче для закону управління $\beta_{\min} = f(\gamma)$, ніж для $\beta = \text{const}$, а використання почергових способів управління тиристорами випрямляча ВД установок з вентиляторним моментом навантаження дозволяє отримати найменші значення потужності трансформатора і статичних компенсуючих пристроїв.