

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
(повнаназва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Бакалаврська дипломна робота на тему:**

«МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПУСКОМ ТА РЕГУЛОВАННЯ  
ЗБУДЖЕННЯМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМ-22мс  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Максим МАШУКОВ  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., ст. викл. кафедри КЕМСК

Андрій КОВАЛЬ

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«28» 05 2024 р.

Рецензент: Юрій ВОЙТЮК

к.т.н. доц. каф. ЕСЕЕМ

(прізвище та ініціали)

«10» 06 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

«28» 05 2024 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“14” 03 2024 року

**З А В Д А Н Й А**  
**НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Машукову Максиму Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація системи керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна

Керівник роботи Коваль Андрій Миколайович, к.т.н., ст. викл. каф. КЕМСК  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “11” 03 2024 року № 80

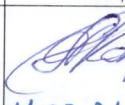
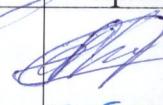
2. Термін подання студентом роботи

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність двигуна – 300 кВт, номінальна частота обертання – 600 об/хв, номінальний струм статора – 57 А, коефіцієнт корисної дії – 94%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Галузі використання та типові способи регулювання синхронних двигунів; Опис будови і принципу дії, а також аналіз існуючих способів пуску СД; Визначення технічних характеристик електродвигуна; Розрахунок техніко-економічного обґрунтування для встановлення тиристорного пристрою плавного пуску та модернізації шафи керування пуском та збудженням синхронного двигуна; Розрахунок силових кіл та побудова механічних характеристик електропривода в асинхронному режимі; Вибір основного обладнання силових кіл статора і ротора, та елементів системи керування; Розробка узагальненої структурної схеми; Розробка модернізованої системи керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна; Охорона праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Узагальнена структурна схема керування пуском та регулювання збудження СД; Схема керування масляним зимикачем; Схема керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна; Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

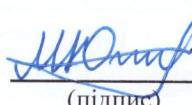
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання	видає
Спеціальна частина	к. т. н., ст. викл. каф. КЕМСК Коваль А.М.	 11.03.24	 28.05.24
Охорона праці	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 11.03.24	 28.05.24

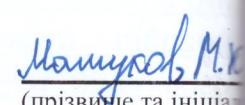
7. Дата видачі завдання 11.03.24

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

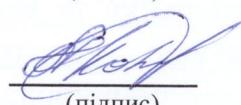
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примі
1	Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)	<u>11.03.2024</u>	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	<u>21.05.2024</u>	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	<u>28.05.2024</u>	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	<u>28.05.2024</u>	
5	Попередній захист БДР	<u>28.05.2024</u>	
6	Нормоконтроль БДР	<u>28.05.2024</u>	
7	Рецензування БДР	<u>10.06.2024</u>	
8	Захист БДР	<u>14.06.2024</u>	

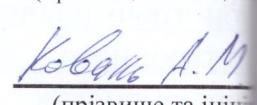
Студент

  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)

## **АНОТАЦІЯ**

Бакалаврська дипломна робота складається з сторінок формату А4, на яких є рисунків, таблиць, список використаних джерел містить найменування.

Метою бакалаврської дипломної роботи є підвищення надійності та ефективності роботи синхронного електроприводу шляхом модернізації системи керування пуском і регулювання збудження синхронного двигуна

Проаналізовано об'єкт модернізації та існуючі способи пуску і регулювання СД. Визначити основні технічні характеристики СД. Проведено техніко-економічне обґрунтування вибору автоматизованої системи пуску та регулювання струму збудження. Розроблено методи та засоби обмеження пускових режимів синхронних двигунів, а також регулювання струму збудження з можливістю побудови його автоматичного регулятора. Здійснено вибір основного обладнання для силових кіл статора та ротора, а також елементів системи керування. Розроблено схеми модернізованої системи керування пуском та регулювання збудження СД. Розглянуті питання охорони праці на виробництві з даним двигуном.

**Ключові слова:** синхронний двигун, асинхронний пуск, ротор, статор, регулювання збудження, DMKR.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis consists of pages of A4 format, on which there are figures, tables, the list of used sources contains names.

The aim of the bachelor thesis is to increase the reliability and efficiency of the synchronous electric drive by modernizing the start control system and regulating the excitation of the synchronous motor

The object of modernization and the existing methods of starting and adjusting the LED were analyzed. Determine the main technical characteristics of SD. A technical and economic substantiation of the choice of an automated system of starting and regulation of the excitation current was carried out. Methods and means of limiting the starting modes of synchronous motors, as well as regulating the excitation current with the possibility of building its automatic regulator, have been developed. The selection of the main equipment for the power circuits of the stator and rotor, as well as the elements of the control system, was made. Schemes of a modernized start-up control system and regulation of LED excitation have been developed. Considered issues of labor protection in production with this engine.

Key words: synchronous motor, asynchronous start, rotor, stator, excitation regulation, DM

ВСТУП.....	5
1.АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА МОДЕРНІЗАЦІЇ .....	8
1.1Будова і принцип дії синхронного двигуна .....	8
1.2 Синхронні і асинхронні режими роботи асинхронного двигуна.....	14
1.3 Аналіз існуючих способів пуску синхронного двигуна .....	17
1.4 Регулювання струмів збудження .....	18
1.5 Висновки до розділу 1 .....	22
2. ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА .....	23
2.1 Призначення двигуна СД2-85/57-10УХЛ4 .....	23
2.2 Технічні данні двигуна СД2-85/57-10УХЛ4 .....	24
2.3 Висновки до розділу 2 .....	28
3.ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	29
3.1 Технічне обґрунтування.....	29
3.2 Економічне обґрунтування .....	30
3.3 Висновки до розділу 3.....	33
4.МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ .....	34
4.1Узагальнена структурна схема системи керування пуском та регулювання збудженням СД.....	34
4.2Попередній розрахунок силових кіл .....	35
4.3Побудова механічних характеристик синхронного двигуна в асинхронному режимі .....	36
4.4 Висновки до розділу 4.....	48
5.ВИБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	49
5.1 Вибір обладнання силових кіл статора та ротора.....	49
5.2 Вибір елементів системи керування.....	53
5.3 Висновки до розділу 5 .....	60
6.РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПУСКОМ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	61
6.1 Схема керування масляним вимикачем .....	61
6.2 Схема керування пуском та регулювання збудженням СД .....	62

6.3 Висновки до розділу 6.....	66
7. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	67
7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту .....	68
7.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць .....	68
7.1.2 Електробезпека .....	70
7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....	71
7.2.1 Мікроклімат .....	71
7.2.4 Виробничий шум .....	74
7.2.5 Виробнича вібрація .....	75
7.3. Пожежна безпека.....	76
Список використаної літератури.....	78
ВИСНОВКИ .....	79

## ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості та технологій вимагає високої ефективності та надійності електричних машин, які є основою більшості виробничих процесів. Одним з найважливіших елементів в цій сфері є синхронні двигуни, які широко використовуються в промислових системах завдяки їх високій ефективності та здатності підтримувати постійну швидкість обертання незалежно від навантаження. Проте, для досягнення оптимальних робочих параметрів та забезпечення стабільної роботи цих двигунів, необхідно мати ефективну систему керування пуском та регулюванням збудженням.

Синхронні двигуни знаходять широке застосування у різних галузях промисловості, транспорту і технологій через їхні властивості та переваги. Серед яких основними є:

- ефективність – СД мають вищу ефективність в порівнянні з АД;
- точність керування швидкістю обертання;
- постійна швидкість обертання – це важливий параметр в пристроях, в яких необхідно стабільна частота обертів, наприклад компресори або насоси;
- корекція коефіцієнта потужності – СД можуть працювати з випереджуючим коефіцієнтом потужності, що дозволяє покращити коефіцієнт потужності всієї мережі підприємства;
- регулювання реактивної потужності в широких межах, що забезпечує їм використання у якості приводів насосного та вентиляційного обладнання середньої та високої потужності у різних галузях.

На підприємствах часто використовують СД: в насосах та вентиляторах – завдяки стабільній швидкості обертання та високій ефективності СД ідеально підходять для керування; компресорах – високі вимоги до стабільності швидкості та ефективності роблять двигуни оптимальним вибором для компресорних установок; конвеерах – виробничі лінії потребують стабільної та точної швидкості руху, що забезпечується

синхронними двигунами; гірничодобувній та металургійній промисловості – використовуються для керування важким та великогабаритним обладнанням так як вони здатні працювати при високих навантаженнях.

Наприклад, у нашому регіоні синхронні двигуни часто використовують у системах електропостачання підприємств цукрової галузі, зокрема для приводу водокільцевих насосів, що створюють розрідження у вапнякових печах, відкачуячи сaturaційні гази для технологічних потреб.

**Метою** є підвищення надійності та ефективності роботи синхронного електроприводу шляхом модернізації системи керування пуском і регулювання збудження синхронного двигуна

Для досягнення мети необхідно:

1. Проаналізувати об'єкт модернізації та існуючі способи пуску і регулювання СД.
2. Визначити основні технічні характеристики СД
3. Провести техніко-економічне обґрунтування вибору автоматизованої системи пуску та регулювання струму збудження
4. Розробити методи та засоби обмеження пускових режимів синхронних двигунів, а також регулювання струму збудження з можливістю побудови його автоматичного регулятора
5. Здійснити вибір основного обладнання для силових кіл статора та ротора, а також елементів системи керування
6. Розробити схеми модернізованої системи керування пуском та регулювання збудження СД
7. Розглянути питання охорони праці на виробництві з даним двигуном

**Об'єктом** дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси, які протікають в синхронному двигуні в асинхронних та синхронних режимах роботи.

**Предметом** дослідження є система керування пуском та регулювання збудженням, яка включає в себе апаратне забезпечення, алгоритми та

програмне забезпечення для реалізації ефективного управління роботою синхронного двигуна.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці нових методів керування пуском та збудженням синхронного двигуна, які враховують сучасні досягнення в галузі електроніки та автоматизації. Запропоновані методи дозволяють зменшити втрати енергії, покращити стабільність роботи та підвищити загальну ефективність системи. Практична значущість роботи полягає в можливості впровадження розроблених методів в реальні промислові системи, що дозволить підвищити продуктивність і надійність обладнання, зменшити витрати на його обслуговування та експлуатацію.

За результатами цієї роботи була зроблена доповідь на тему «Модернізація системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна» на LIII Науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького національного технічного університету (2024) з публікацією тез.

## 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА МОДЕРНІЗАЦІЇ

### **1.1 Будова і принцип дії синхронного двигуна**

Синхронний двигун – це електрична машина змінного струму, в якої частота обертання ротора знаходиться у відповідності з частотою обертання мережі. Вона може працювати як і в генераторному режимі так і в двигунному, але в промисловості випускаються окремо двигуни і генератори. По своїй конструкції вони відрізняються від асинхронних двигунів лише ротором, який буває явнополюсним та неявнополюсним. Синхронна машина має синхронну частоту обертання ротора ( $n_2 = n_1 = \text{const}$ ), та має можливість регулювати коефіцієнт потужності, при якому робота СД стає економічнішою в порівнянні з АД.

Синхронні генератори являються основним обладнанням для різних типів електростанцій, майже всю згенеровану електроенергію виробляють генератори великої потужності, яка досягає мільйона кіловат і більше.

Синхронні двигуни, в свою чергу, використовуються на підприємствах для приводу пристройів великої потужності. За своїми характеристиками вони перевершують двигуни інших типів, та використовуються як компенсатори реактивної потужності.

Синхронний двигун складається з рухомої частини – ротора, і нерухомої – статора. Магнітопровід статора розташований в корпусі машини, він набирається з пластин електротехнічної сталі. На внутрішній поверхні виконані пази, в яких знаходиться симетрична обмотка.

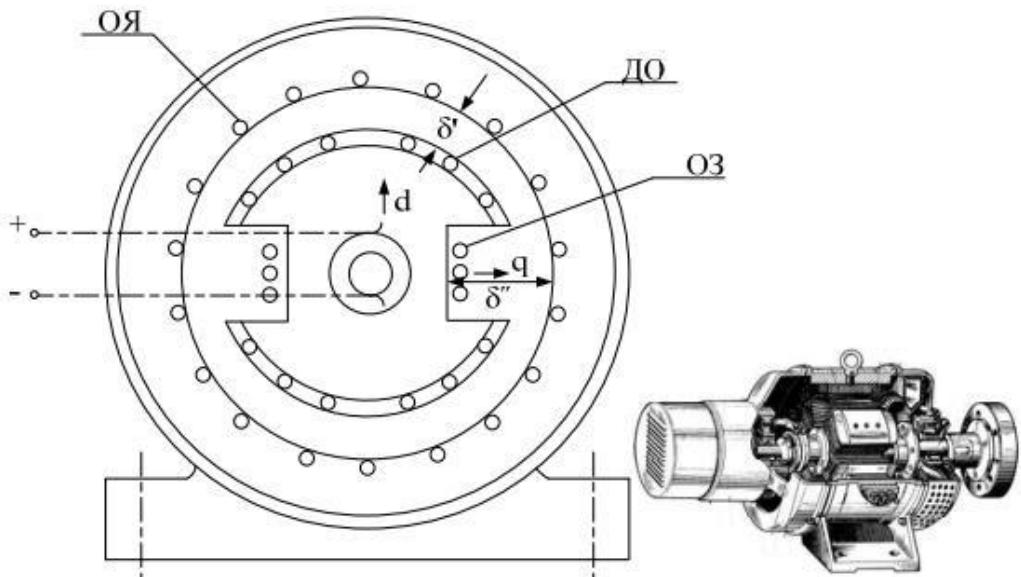


Рисунок 1.1 – Поперечний переріз явнополюсного СД

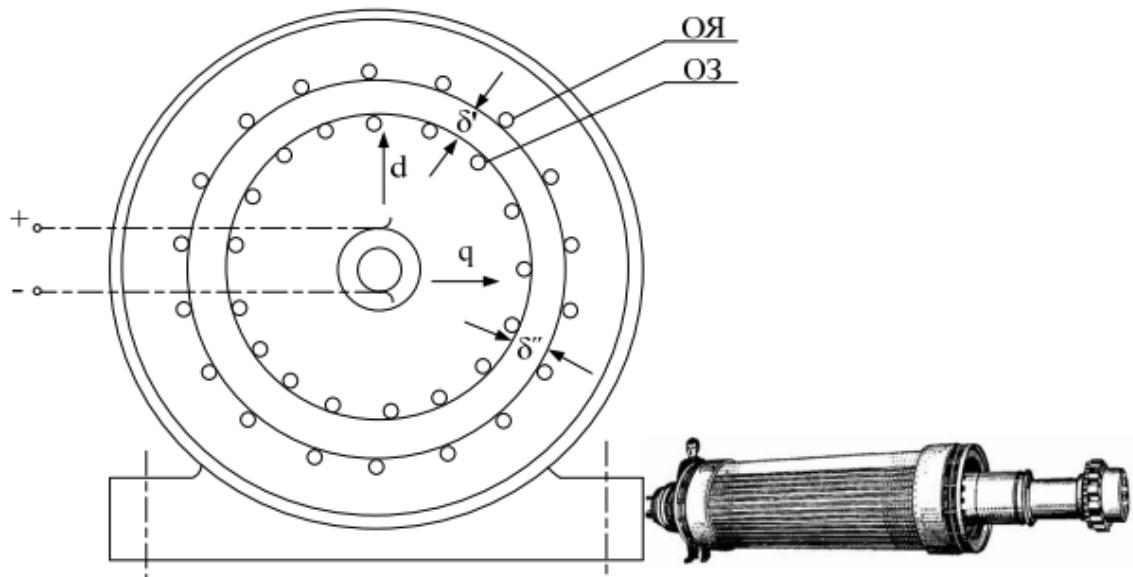


Рисунок 1.2 – Поперечний переріз неявнополюсного СД

На роторі розміщена обмотка збудження (ОЗ), яка складається з котушок індуктивності, розташованих на полюсах машини, які з'єднані послідовно. ОЗ живиться постійним струмом від джерела постійного струму.

У наконечниках явно полюсного ротора розміщена демпферна обмотка (ДО), яка складається з неізольованих стержнів вкладених у пази, з'єднаних по кінцях короткозамкненими кільцями. Вона призначена для створення

магніторушійної сили при відхиленні швидкості ротора від синхронної.

Для синхронних двигунів малої потужності не потрібна ДО, тому що неявно полюсний ротор виконується суцільним та масивним і її роль виконує сам ротор в якому генеруються вихрові струми які при взаємодії з магнітним полем статора утворюють демпферні моменти на роторі.

Магнітна вісь полюсів ротора називається поздовжньою віссю (віссю d) синхронної машини, вісь q – поперечною, вона зміщена щодо повздовжньої осі на 90 ел. град.

У явнополюсній машині зазор між статором і ротором під полюсами  $\delta'$  і в міжполюсному просторі  $\delta''$  неоднаковий; як видно із рис. 1.1,  $\delta' < \delta''$ . Отже, ротор явнополюсної машини має магнітну асиметрію, оскільки магнітні провідності машини по осіах d і q різні (по осі d вона більша). Крім магнітної, для явнополюсного ротора характерна електрична асиметрія, оскільки обмотка збудження створює поле тільки по осі d і взаємодіє з сторонніми полями, що діють по цій осі.

Неявнополюсна синхронна машина, як видно з рис. 1.2, має постійний зазор, рівний  $\delta'$  по всьому периметру індуктора. Обмотка збудження розміщена в пазах на роторі і розподілена на його поверхні. Неявнополюсний ротор має тільки електричну несиметрію, а як магніт він симетричний.

Принцип дії синхронного двигуна:

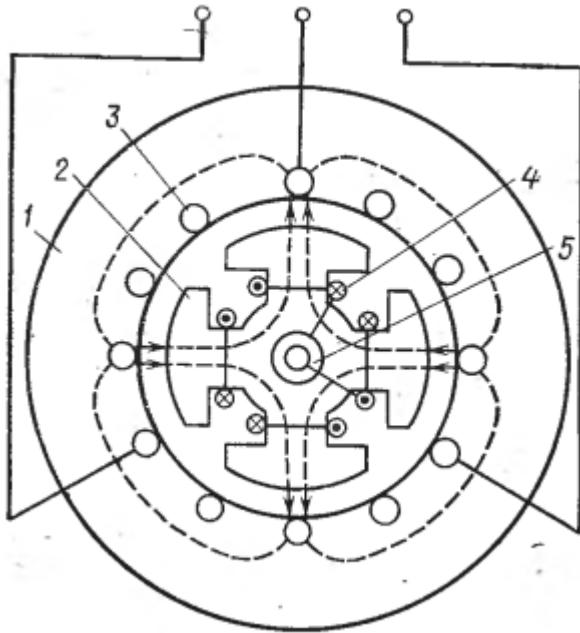


Рисунок 1.3 – Електромагнітна схема чотирьохполюсної синхронної машини

На рис. 1.3 зображена схема чотирьохполюсної синхронної машини. На сердечнику статора 1 розміщена обмотка якоря 3. Якщо ротор з полюсами 2 привести в обертання первинним двигуном, а до обмотки збудження підвести постійний струм через контактні кільця і щітки, то виникне магнітне поле, що обертається з частотою обертання ротора. Це обертове магнітне поле буде перетинати провідники обмотки якоря і наводити в них ЕРС, яка змінюється в залежності від положення ротора. Частота зміни ЕРС відповідає частоті обертання ротора. В чотирьохполюсній машині один оберт ротора відповідає двом періодам ЕРС. Машина, що має  $p$  – полюсів, генерує частоту ЕРС, яка пропорційна частоті обертання ротора і числу полюсів:

$$f = \frac{p}{2} * n \quad (1.1)$$

де  $f$  – частота ЕРС;

$p$  – число пар полюсів;

$n$  – частота обертання ротора.

Якщо обмотку статора включити в трифазну мережу, то в ній

виникнуть струми, що створюють магнітне поле, яке обертається з незмінною синхронною частотою  $n$  і при постійній частоті струму  $f$ . Обмотка збудження своєю чергою створює поле полюсів, яке обертається разом з ротором з синхронною частотою  $n$ , поля якого рухаються відносно поля статора. Машина змінного струму, частота обертання ротора якого знаходиться в строгій залежності від частоти струму мережі і дорівнює частоті обертання магнітного поля, що бере участь у процесі перетворення енергії, називається синхронною.

Принцип дії синхронної машини пояснюється на рис. 4, на якому магнітні поля ротора і статора зображені у вигляді двох систем полюсів, що обертаються з однаковою синхронною частотою  $n$  в напрямку, вказаному стрілками. При відсутності струму в обмотці статора (холостий хід) збуджений ротор обертається з синхронною частотою  $n$  з моменту первинного пуску  $M_1$ . Лінії магнітного поля в полюсах статора утворюють продовження ліній поля ротора і осі магнітних полів статора і ротора співпадають (рис. 4, а)

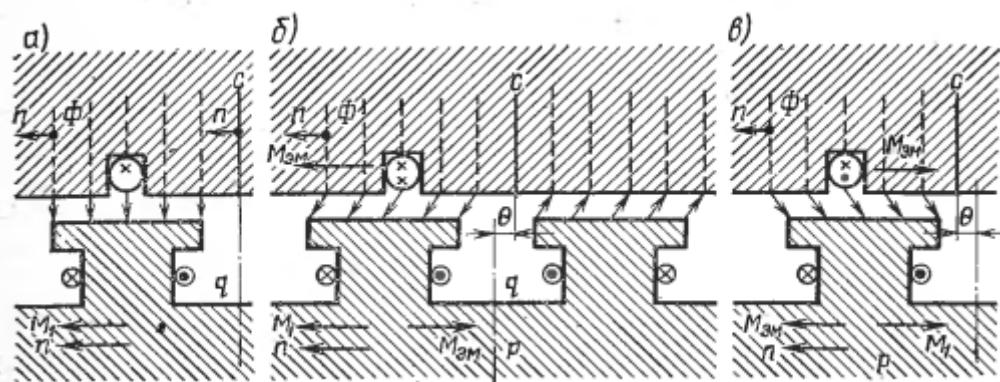


Рисунок 1.4 – Схеми режимів роботи синхронного двигуна

У цьому випадку силові лінії магнітного поля в зазорі не відчують ніякого розтягнення. Напрямок ЕРС, індукованої в провідниках обмотки статора магнітним потоком  $\Phi$ , визначено за правилом правої руки.

Якщо збільшити обертовий момент  $M_1$  первинного двигуна, то ротор машини почне зміщуватись відносно полюсів статора вперед за напрямом обертання, і кут між осями магнітних полів статора і ротора збільшиться

(рис. 1.4, б). Силові лінії магнітного поля в зазорі розташовані похило, і з'являється тангенціальна складова вектора магнітної індукції, спрямована по дотичній до окружності ротора в сторону, протилежну його обертанню. У цьому випадку на ротор крім механічної сили первинного двигуна буде діяти електромагнітна сила, що створює гальмівний електромагнітний момент  $M_{em}$ , направлений проти моменту  $M_1$ . Збільшення кута  $\theta$  і протидіючого моменту  $M_{em}$ , буде відбуватися до тих пір, поки  $M_{em}$ , не стане рівним  $M_1$ . Після цього збільшення кута  $\theta$  припиниться, і ротор машини буде встановлений в режимі обертання з синхронною частотою  $n$ . Надмірне збільшення моменту  $M_1$ , а, отже, і кута  $\theta$  не допускається, так як може порушитися електромагнітна взаємодія між магнітним полем ротора і статора. За напрямком сили  $F_{am}$ , прикладеної до обмотки статора, згідно правилу лівої руки знаходимо напрямок струму в провідниках обмотки статора. У цьому випадку напрямок струму в обмотці статора збігається, отже, машина працює в режимі генератора.

Якщо обмотка статора синхронної машини підключена до мережі змінного струму і на валу її немає яких-небудь механічних навантажень, то момент  $M_1$  буде гальмівним, направленим проти обертання ротора. На рис. 1.4, в показано, що в цьому випадку осі поля статора змістилися відносно осі поля ротора на кут  $\theta$  по напряму обертання ротора, внаслідок чого змінилися нахили магнітних ліній в зазорі і напрям моменту, тобто момент стає гальмівним і синхронна машина працює в режимі двигуна. Таким чином, в генераторному режимі роботи синхронної машини осі поля ротора випереджають осі поля статора на кут  $+θ$ , а в двигунному режимі відстають на кут  $-θ$ . Кут  $\theta$  характеризує навантаження в будь-якому режимі роботи машини. Найбільш розповсюджена форма конструкції синхронної машини — розташування обмотки якоря на статорі, а обмотки збудження — на роторі. У цьому випадку для включення обмотки якоря в мережу змінного струму потрібні три або чотири нерухомих контакти, що особливо важливо при великих потужностях і високих напругах. Включення обмотки збудження в

мережу постійного струму через два контактних кільця і щітки не викликає перешкод, так як напруга не перевищує 300-400 В, а потужність, що споживається їй, складає всього 0,2-2,5% номінальної потужності машини.

Найбільше поширення отримали синхронні машини як генератори змінного струму, які встановлені на всіх стаціонарних і пересувні електричних станціях. Широко застосовуються синхронні двигуни, що використовуються для установок великої потужності (більше 50 кВт), які потребують регулювання частоти обертання. Спеціальні синхронні мікродвигуни потужністю до декількох десятків ват застосовані в схемах автоматичного управління і регулювання.

## **1.2 Синхронні і асинхронні режими роботи асинхронного двигуна**

Пуск СД ввімкненням до мережі неможливий, тому що ротор не може відразу бути захопленим МП статора і магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Щоб запустити двигун необхідно розігнати ротор до частоти близької до синхронної, при якій встановлюється магнітний зв'язок.

Це пояснюється тим, що обертове магнітне поле обмотки якоря з'являється практично миттєво і рухається в просторі з синхронною швидкістю  $\omega_1$ . Полюси цього поля, переміщаючись в просторі, будуть взаємодіяти то з одноіменними, то з різноіменними полюсами нерухомого збудженого ротора. Відповідно до цього буде змінюватися напрямок обертового моменту, який діє на ротор. Протягом половини періоду зміни струму в обмотках момент буде спрямований в одну сторону, а протягом іншої половини – у протилежну.

Пуск міг би відбутися, якби ротор розігнався до сталої швидкості протягом першого півперіоду після вмикання, коли обертовий момент не змінює свій знак. При частоті 50 Гц півперіод дорівнює 0,01 с. Через механічну інерцію за такий час ротори практично всіх синхронних двигунів розігнатися не зможуть.

Існує кілька способів пуску двигуна. Вони полягають у тому, що в процесі пуску ротор двигуна розганяється до швидкості обертового поля, після чого двигун входить у синхронізм і починає працювати як синхронний.

Способи пуску:

- пуск за допомогою розгінного двигуна;
- частотний пуск;
- асинхронний пуск.

Пуск за допомогою розгінного двигуна полягає в тому, що стороннім двигуном ротор СД розганяється до синхронної швидкості, після чого вмикається пускова обмотка постійного струму і розгінний двигун відводять і СД входить в синхронізм.

Частотний пуск застосовується в тому випадку, якщо синхронний двигун підключений до автономного джерела, частоту напруги якого можна змінювати від нуля до номінальної. Якщо плавно підвищувати частоту напруги живлення, то відповідно буде збільшуватися швидкість магнітного поля. Ротор, підхоплений полем статора, поступово буде підвищувати свою швидкість від нуля до номінальної. У процесі пуску машина увесь час працює в синхронному режимі. З точки зору перехідних процесів та тривалості пуску частотний пуск є оптимальним. Недоліком такого пуску є необхідність в перетворювачі частоти, вартість якого в більшості випадків перевищує вартість електродвигуна.

Асинхронний пуск аналогічний пуску асинхронного двигуна. Для цього потрібно на роторі розмістити демпферну обмотку, що виконується у вигляді короткозамкненої обмотки (біляча клітка) ротора АД. При пуску магнітне поле статора змушує обертатися і ротор СД завдяки розташованій на роторі демпферної обмотки, і з допомогою цього ротор почне рухатися й розженеться до швидкості, близької до швидкості поля  $n_1$ . Обертання буде відбуватися з ковзанням  $s$ , яке залежить від навантаження на валу.

Входження в синхронізм відбувається після включення обмотки

збудження за рахунок синхронізуючого моменту, який при цьому виникає.

Під час пуску ОЗ вона має бути підключена на навантаження тому що, через велику кількість витків у ній магнітним полем буде індукуватись ЕРС, яка небезпечна не тільки для ізоляції, а ще й для персоналу. Обмотку збудження не можна також замикати накоротко, тому що в цьому випадку вона утворить несиметричний (однофазний) контур. Такий контур є причиною утворення додаткового моменту Моз (рис. 2.2), під дією якого спостерігається провалу кривій механічної характеристики двигуна  $M = f(s)$  поблизу напівсинхронної швидкості при ковзанні  $s \approx 0,5$ . Результатуючий момент синхронного двигуна при асинхронному пуску обчислюватиметься як сума моментів пускової (демпферної) обмотки  $M_{\text{до}}$  та обмотки збудження  $M_{\text{оз}}:$

$$M = M_{\text{до}} + M_{\text{оз}} \quad (1.2)$$

Внаслідок такого провалу ротор при пуску може застягти на проміжній швидкості. Таке явище роботи синхронного двигуна з усталеною швидкістю, що відповідає половині синхронної, називається одноосним ефектом. Для уникнення одноосного ефекту на початку пуску обмотка збудження повинна бути замкнута на резистор з опором, приблизно в 10-15 разів більшим, ніж опір самої обмотки. Після закінчення пуску обмотка збудження відмикається від опору і вмикається на джерело постійного струму.

### 1.3 Аналіз існуючих способів пуску синхронного двигуна

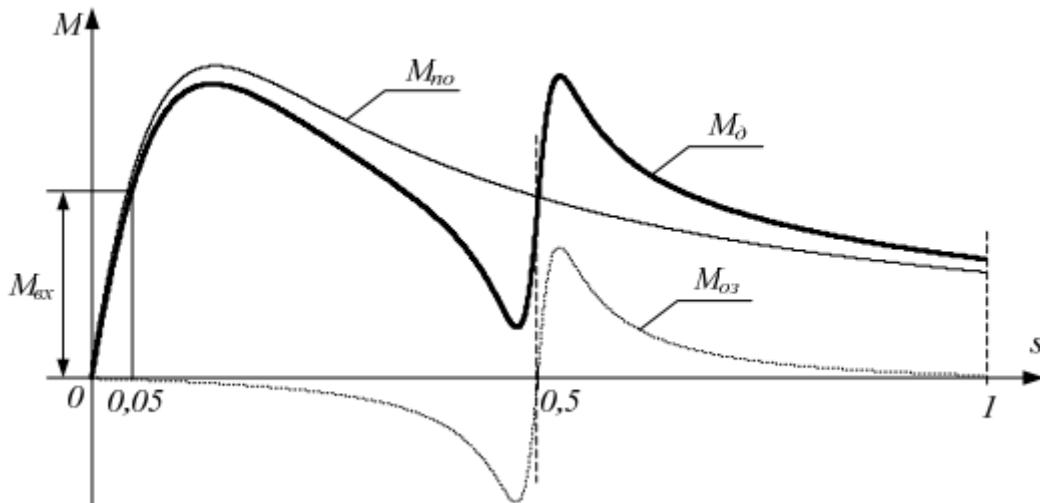


Рисунок 1.5 – Механічні характеристики обмоток синхронного двигуна при асинхронному пускові

Асинхронний пуск синхронного двигуна характеризується значеннями пускового струму й обертальних моментів – початкового пускового  $M_p$  (при  $s = 1$ ) і вхідного  $M_{bx}$  (рис. 2.2). Вхідним називається асинхронний момент при швидкості ротора, рівній  $0,95\omega_1$  ( $s = 0,05$ ). Цей момент дорівнює найбільшому навантажувальному моментові, при якому можливе входження двигуна в синхронізм при включені постійного струму в обмотку збудження.

Якщо мережа, в яку вмикається синхронний двигун, недостатньо потужна, то для того, щоб уникнути великого спаду напруги при асинхронному пуску, застосовують заходи для зниження початкового пускового струму: ввімкнення через автотрансформатор, реактор тощо.

Частота обертання синхронного двигуна п дорівнює частоті обertового магнітного поля  $n_1$ , тобто

$$n = n_1 \frac{60 \times f_1}{p} \quad (1.3)$$

Тому її можна регулювати шляхом зміни частоти напруги живлення або числа полюсів  $2p$ .

Регулювати частоту обертання шляхом зміни числа полюсів у синхронному двигуні недоцільно, тому що на відміну від асинхронного тут потрібно змінювати число полюсів як на статорі, так і на роторі, що приводить до значного ускладнення конструкції ротора. Тому практично використовують лише зміну частоти напруги живлення. До синхронного двигуна можуть бути застосовані всі основні положення теорії частотного регулювання асинхронного двигуна, у тому числі необхідність одночасної зміни як частоти  $f_1$ , так і напруги живлення  $U$ . У чистому вигляді частотне регулювання частоти обертання синхронних двигунів застосовується тільки при дуже малих потужностях, коли навантажувальні моменти невеликі, а інерція приводного механізму мала.

При великих потужностях такі умови є тільки в деяких типах електроприводів, наприклад в електроприводах вентиляторів. Для синхронних двигунів, що використовуються в електроприводах з великим моментом інерції приводного механізму, необхідно дуже плавно змінювати частоту напруги живлення, щоб двигун не випав із синхронізму. Для таких електроприводів найбільш придатним є метод частотного регулювання із самосинхронізацією, при якому двигун у принципі не може випасті із синхронізму.

#### 1.4 Регулювання струмів збудження

При пуску синхронних двигунів потужністю кілька мегават виникає необхідність обмеження пускових струмів. Способи обмеження пускових струмів випливають з рівняння струму короткого замикання асинхронного двигуна.

$$i_{k3} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_{1\sigma}+X_{2\sigma})^2}} \quad (1.4)$$

де  $U_{1j}$  – фазна напруга обмотки статора

$R_1$  та  $X_{1\sigma}$  – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки статора  
 $R_2$  та  $X_{2\sigma}$  – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки ротора  
З аналізу виразу струму короткого замикання АД випливають три можливі способи струмообмеження при асинхронному пуску СД:

1. введення на час пуску додаткового активного опору в ланцюзі обмоток статора;
2. введення на час пуску додаткового реактивного опору в ланцюзі обмоток статора
3. короткочасне зменшення на час пуску фазної напруги обмоток статора.

Найбільш часто струмообмеження при пуску синхронних двигунів здійснюється використанням реакторів  $L$ , що включаються в ланцюзі обмоток статора. У деяких випадках замість реакторів  $L$  застосовуються активні резистори. Короткочасне зниження напруги обмоток статора досягається включенням в схему трансформаторів або автотрансформаторів. Варіант схеми обмеження струму статора при пуску синхронного двигуна із застосуванням автотрансформатора

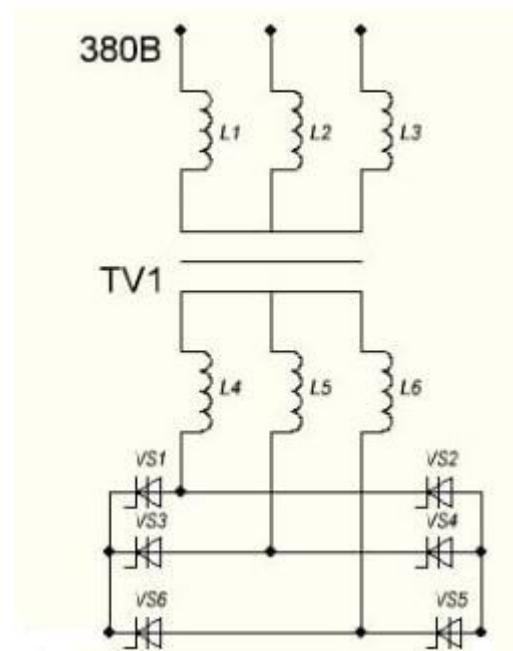


Рисунок 1.6 – Схема керування збудженням СД

На рис. 6 зображене регулювання збудженням, яке здійснюється зміною кута керування тиристорів. Трансформатор вибирається на вторинну напругу залежно від необхідного коефіцієнта форсування. Зазвичай форсування приймають таким, щоб при повністю відкритих тиристорах мосту напруга на обмотці збудження дорівнювала 1,5-3-кратному номінальному. Форсування по струму приймається до 1,5-кратного номінального струму збудження. У ряді застосувань достатньо мати тиристори тільки в одній половині моста Т1, в іншій можуть бути діоди (Д). Симетрична мостова схема, з тиристорами обох половинах застосовується лише у випадках, коли потрібно як швидке форсування, а й швидке відновлення колишнього збудження, що досягається інверторним режимом перетворювача з віддачею енергії поля до мережі. Пуск синхронного двигуна в асинхронному режимі виходить простіше і надійніше за напівпровідникового управління розрядним резистором. Контактор збудження М з засувкою і перекриттям замикаючого та розмикаючого контактів замінюється на діод Д і тиристор Т. Під час пуску синхронного двигуна тиристори Т закриті, а тиристор 7 відкритий і разом з діодом Д дозволяє протікати змінному струму, індукованому в обмотці збудження. При підсинхронній частоті обертання включаються тиристори Т1 і Т2 вимикається тиристор Т і двигун входить у синхронізм. У цій схемі обмотка збудження завжди підключена до розрядного резистора діодом Д, що дає надійний захист се від перенапруг.

Уявімо намагнічуючу силу обмотки збудження та поперечну НС обмотки якоря двома системами синхронно обертових постійних магнітів. Однокомпонентні полюси відштовхуються, а різноманітні притягуються, сили взаємодії полюсів мають тангенціальну складову, яка намагається повернути одну полюсну систему відносно іншої, створюючи момент синхронної машини: гальмівний для генератора і обертовий для двигуна. Якщо під впливом цього моменту ротор обертається з частотою  $n$ , то машина при цьому працює в режимі двигуна. Якщо ротор обертається по стороннім

двигуном з частотою:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1.5)$$

в іншу сторону то машина працює в генераторному режимі, в якому розглянута взаємодія полюсів створює гальмівний момент.

Якщо провести зміну постійних магнітів з повздовжньою реакцією якоря, то сили взаємодії полюсів статора і ротора направлені радіально, і тому така машина не розвиває моменту, тому при  $+I_d$  відбувається розмагнічування, а при  $-I_d$  – підмагнічування.

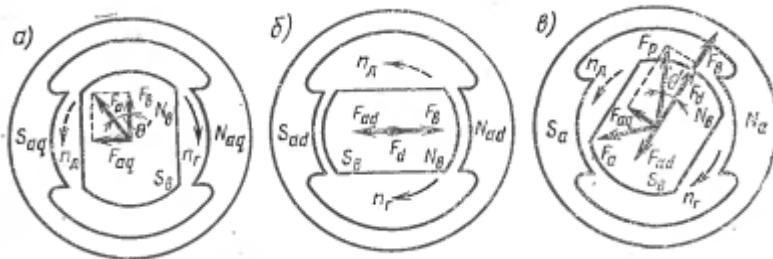


Рисунок 1.7 – Вплив поперечної, повздовжньої та поперечно-повздовжньої реакції якоря на момент синхронної машини

На рис. 1.7 в) зображене випадок коли наявні повздовжня  $F_{ad}$  та поперечна  $F_{aq}$  реакції якоря. Рівняння для цього випадку матиме вигляд:

$$F_d = F_a - F_{ad};$$

$$F_p = F_d + F_{aq}.$$

Кут  $\Theta$  між  $F_p$  та  $F_d$  являється кутом між осями результуючого поля і поля обмотки збудження. Чим більше кут  $\Theta$ , тим більше момент і активна потужність синхронної машини. Кут  $\Theta$  не може бути більший за  $90^\circ$  електричних градусів (зазвичай  $F_{ad} < F_{aq}$ ) і показує, на скільки змістилась вісь результуючого магнітного поля при даному навантаженні в порівнянні з тим положенням, яке воно займало при холостому ході генератора, коли співпадає з геометричною віссю полюсів.

**Висновок.** Проаналізовано будову, принцип дії, режими роботи та регулювання струмів збудження в результаті чого, можна зробити висновки, що для виконання поставленого завдання підходить двигун явнополюсний, з асинхронним пуском та зі схемою керування збудженням СД рисунок – 6 .

## 2 ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

### **2.1 Призначення двигуна СД2-85/57-10УХЛ4**

Синхронний двигун серії СД2 трьохфазного струму зі статичної системою збудження призначений для приводів механізмів, які не потребують регулювання швидкості обертання (насоси, вентилятори та ін.). Двигун зберігає номінальну потужність при відхиленні напруги мережі від номінального значення в межах від -5% до +10%, і відхиленні частоти мережі від номінального значення 25%.

Призначенні, в залежності від матеріального виконання, для стиснення повітря, інертних або агресивних газів, що не розчиняються у воді для загальнопромислового застосування. Застосовуються у хімічній, металургійній, харчовій промисловості, машинобудуванні, сільському господарстві та будівництві. Основна перевага компресорів - простота роботи та обслуговування. Компресори не мають спеціальної системи мащення та оливонасосів. Всі зазори між ротором, що обертається, і нерухомим корпусом ущільнені робочою рідиною. Простота конструкції, відсутність пар, що трутися у проточній частині, забезпечують надійність та довговічність роботи компресора.

Двигун розрахований на довготривалий режим роботи при номінальних даних в наступних умовах:

- висота над рівнем моря до 1000 метрів;
- концентрація пилу в оточуючому середовищі не більше 2 мгр/м<sup>3</sup>;
- температура оточуючого середовища в межах від +1 до +40°C;
- відносна вологість повітря при температурі +25°C не більше 80%;
- при температурі оточуючого повітря більше +40°C (але не більше +45°C) потужність двигуна повинна бути знижена так, щоб перевищення температур активних і конструктивних частин двигуна були не більше +43°C

- не допускається експлуатація двигуна при наявності в оточуючому середовищі агресивних газів, парів кислот і лужного або струмопровідного пилу

## 2.2 Технічні данні двигуна СД2-85/57-10УХЛ4

Основні параметри двигуна приведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – параметри двигуна СД2-85/57-10УХЛ4

	Значення	ОВ
Позначення типу двигуна	СД2- 85/57- 10УХЛ4	
Номінальна потужність	300	кВт
Номінальна частота обертання	600	об/хв
Номінальний струм статора	57	A
ККД	94	%
M <sub>макс</sub>	1.7	-
M <sub>ном</sub>	1.7	-
K <sub>пуск</sub>	1.1	-
K <sub>ном</sub>	1.1	-
I <sub>пуск</sub>	5.2	A
I <sub>ном</sub>	5.2	A
Напруга збудження	43	B
Струм	161	A
Маса	2923	Кг

Номінальна напруга двигуна 6 кВ, коефіцієнт потужності (при випереджаючому струмові) – 0.9, напруга живлення ланцюгів захисту 220 В

постійного струму. При потребі ланцюги захисту можуть бути виконані на напрузі 220 В змінного струму, або 110 В постійного струму. Двигун допускає обертання в обидві сторони, але реверс здійснюється лише із стану спокою.

В двигуні допускається перевищення температури активних і конструктивних частин при тривалому номінальному навантаженні і температурі оточуючого повітря  $+40^{\circ}\text{C}$ . Двигун розрахований на пряний пуск від номінальної напруги мережі і допускає 2 пуски підряд з холодного стану і 1 пуск з гарячого стану

Збудження двигуна відбувається з допомогою пристрою тиристорного збудження з живленням від додаткової обмотки. Цей прилад забезпечує:

- автоматичну подачу збудження в функції струму статора;
- форсування 1.4 номінального струму збудження при падінні напруги мережі на 15-20% від номінального значення. Форсування збудження припиняється при відновленні напруги мережі до  $92\pm2\%$  від номінального його значення;
- обмеження величини напруги збудження по мінімальному і максимальному значенні струму збудження ;
- форсоване гасіння поля ротора переводом перетворювача в інверторний режим;
- захист від внутрішніх і зовнішніх коротких замикань

В тиристорно-збуджувальному приладі передбачений ручний режим керування зі стабілізацією струму збудження та встановлений пусковий опір

Показники надійності і довговічності двигуна:

- повний термін служби не менше 20 років;
- коефіцієнт готовності не менше 0.99;
- середнє напрацювання на відказ, не менше 12000 годин;
- термін служби до капітального ремонту не менше 5 років.

Для двигуна СД2-85/57-10УХЛ4 межі регулювання подачі збудження в функції струму статора від 70 до 125 А.

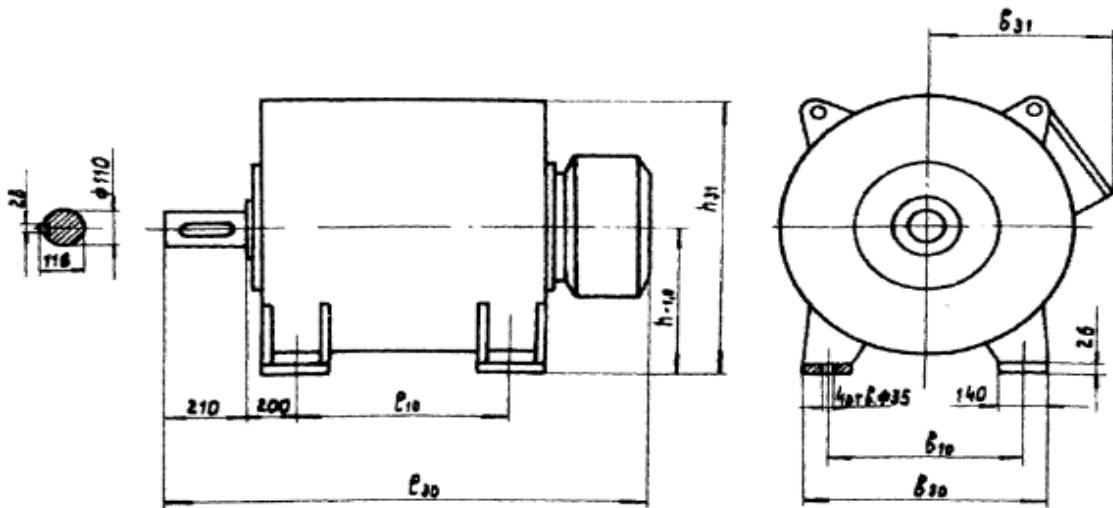


Рисунок 2.1 – Конструктивне виконання двигуна

Виконання двигуна горизонтальне, захищене, з самовентиляцією, на двох підшипниках, з одним циліндричним кінцем валу. Статор набирається в пакет з окремих лакованих з обох сторін листів, штампованих з листової електротехнічної сталі товщиною 0.5 мм. Між пакетами для утворення радіальних каналів установлюються листи з вентиляційними розпірками. Осердя запресоване в станині і закріплена від осьового зсуву з допомогою опорних шпонок, а від провертання – шляхом зварювання його до ребер станини.

Основна обмотка статора двошарова з скороченим кроком, виконана з окремих шаблонних котушок, намотаних із прямокутної обмоткової міді. Котушки укладені в пази статора і закріплені клинцями. Пайка міжкотушкових і групових з'єднань виконується тугоплавким припоєм. Додаткова обмотка призначена для живлення пристаду тиристорного збудження, одношарова, з скороченим кроком виконана з окремих котушок прямокутного мідного проводу. Котушки вкладені на дні пазу статора. Ротор двигуна виконаний з явними полюсами, які кріпляться до остову ротора, який в свою чергу, збирається з окремих штампованих сталевих листів, які стягуються шпильками в загальний пакет.

Сердечники полюсів ротора збираються з окремих штампованих сталевих листів, скріплених заклепками в пакети, обмотка полюсів виконана

в вигляді котушок, виготовлених із шинної міді, зігнутої на ребро. Ізоляція обмотки статора термореактивна типу «Моноліт-2» класу нагрівостійкості «F» з температурним використанням на рівні класу «Б». Ізоляція обмотки ротора також класу «Б».

Пускова обмотка двигуна складається з круглих мідних стержнів розташованих в вершинах полюсів. Кінці стержнів припаються тугоплавким припом до мідних сегментів. Сегменти з'єднуються з двох сторін один з одним пайкою, створюючи два замкнених кільця.

Контактні кільця розташовані зі сторони оберненій приводу, і винесені за підшипник, кріпляться вони шпильками через пластмасові втулки до валу. Струмопровід від контактних кілець до обмотки ротора здійснений проводом пропущеним через центральний отвір в валу. Траверса контактних кілець складається з двох сегментних шин, ізольованих від корпусу і один від одного пластмасовими втулками. На шинах траверси встановлені щіткотримачі, конструкція яких передбачає регулювання жimu щіток в радіальному напряму по мірі спрацювання їх і контактних кілець. Траверса кріпиться з допомогою шпильок на фланці, закріплена на щиті підшипником. Контактні кільця і траверса закриваються знімним клапаном

Щити підшипників зварні. В центральний отвір щитів встановлені підшипники, насаджені на вал ротора. В двигуні застосовується однорядний кульковий підшипник зі сторони контактних кілець і однорядний роликовий підшипник зі сторони приводу.

Станина зварювана з поперечними і повздовжніми ребрами жорсткості, з вікнами в зовнішній обшивці для виходу повітря. Коробка виводів розташована справа. В ній розташовані 6 кінців від основної обмотки статора, закріплені ізоляційними колодками, клемник додаткової обмотки і пробивний запобіжник. Чотири кінці ДО статора під'єднані до клемника.

Двигун має радіальну вентиляцію. Розхід повітря, необхідний для охолодження двигуна, забезпечується напором створюваний вентиляційною дією полюсів ротора і вентиляційними лопатками. Повітря, яке охолоджує

двигун, всмоктується через вентиляційні вікна в щитах, просувається до лобових частин обмотки статора і в між полюсний простір ротора, а після, пройшовши радіальні канали статора і лобові частини, виходить через бокові вікна станини.



Рисунок 2.2 – Фото двигуна СД2-85/57-10УХЛ4

**Висновок.** Визначено призначення двигуна та складена таблиця 1 з параметрами двигуна СД2-85/57-10УХЛ4. Її будемо використовувати для всього подальшого розрахунку.

## 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 3.1 Технічне обґрунтування

Розглянемо для порівняння такі системи електроприводу:

1. Встановлення тиристорного пристрою плавного пуску

2. Модернізація шафи керування

Переваги методу встановлення тиристорного пристрою плавного пуску:

- ефективність регулювання – ТРН дозволяють плавно та точно змінювати напругу, що дає можливість тонкого налаштування режимів роботи двигуна;

- енергозбереження – регулювання напруги може зменшити споживання напруги, оскільки двигун працює тільки на потрібних обертах;

- широкий діапазон регулювання частоти обертання – тиристори дозволяють керувати великим діапазоном регулювання ;

- маса – мала вага та габарити в порівнянні з механічними або трансформаторними регуляторами;

- надійність – відсутність рухомих частин зменшує ймовірність механічних збоїв;

- дистанційне керування – сучасні ТРН можуть інтегруватися з системами автоматизації.

Недоліки цього методу:

- гармонічні спотворення – тиристори можуть викликати гармонічні спотворення в мережі живлення, що може впливати на роботу інших пристрій;

- електромагнітні завади – робота тиристорних регуляторів може створювати електромагнітні завади, що вимагає додаткових заходів для їх зменшення (наприклад, фільтри);

- вартість - хоча тиристорні регулятори часто дешевші за інші види регуляторів, їх вартість все одно може бути значною, особливо для високопотужних застосувань;

- температурні обмеження - тиристори мають обмеження по температурі, що вимагає ефективного охолодження та може обмежити їх використання в умовах високих температур;
- зниження коефіцієнта потужності - використання тиристорних регуляторів може привести до зниження коефіцієнта потужності мережі, що потребує компенсації за допомогою додаткових пристрій.

### **3.2 Економічне обґрунтування**

З мережі інтернет знайдемо вартості двигунів та силових перетворювачів кожної з систем електроприводу. Результати зведемо до табл. 2

Виконаємо розрахунок системи з встановленням тиристорного пристрою плавного пуску

Капітальні затрати:

$$K = K_{\text{пп}} + K_{\text{роб}} \quad (3.1)$$

де  $K_{\text{пп}}$  – вартість тиристорного пристрою плавного пуску ( $K_{\text{пп}}=2500000$  грн);

$K_{\text{роб}}$  – вартість за монтаж ( $K_{\text{роб}}=48890$  грн).

Таким чином, отримаємо:

$$K = 2500000 + 48890 = 2548890 \text{ (грн)}$$

Річні капітальні затрати:

$$K_p = 0.17K \quad (3.2)$$

$$K_p = 0.17 \cdot 2548890 = 4333311,3 \text{ (грн/рік)}$$

Час роботи механізму на рік:

$$t_{\text{пік}} = d \cdot t \cdot TB \quad (3.3)$$

де  $d$  – кількість робочих днів ( $d=365$  днів)

$t$  – кількість робочих годин в день ( $t=24$  годин)

ТВ – тривалість увімкнення механізму (ТВ = 100% = 1 в.о.)

За рік отримаємо час роботи:

$$t_{\text{рік}} = 365 \cdot 24 \cdot 1 = 8760 \text{ (год/рік).}$$

Знайдемо затрати на виконання роботи електричним двигуном при роботі зі встановленою потужністю протягом року

$$Z_{\text{вст}} = c \cdot P_{\text{вст}} \cdot t_{\text{рік}} \quad (3.4)$$

де  $P_{\text{вст}}$  – встановлена потужність з врахуванням того, що в роботі знаходиться постійно лише СД ( $P_{\text{вст}}=500$  кВт);

$c$  – вартість електроенергії ( $c = 5$  грн./кВт·год).

Отримаємо

$$Z_{\text{вст}} = 5 \cdot 500 \cdot 8760 = 21900000 \text{ (грн/рік)}$$

Виконаємо розрахунок з модернізацією шафи керування пуском і системи збудження:

Капітальні затрати:

$$K = K_{\text{пект}} + K_{\text{сک}} + K_{\text{роб}} \quad (3.5)$$

де  $K_{\text{пект}}$  – вартість реакторів ( $K_{\text{пект}}=396000$  грн);

$K_{\text{сک}}$  – вартість системи керування ( $K_{\text{ск}}=188000$  грн);

$K_{\text{роб}}$  – вартість за монтаж ( $K_{\text{роб}}=112000$  грн).

Таким чином, отримаємо:

$$K = 396000 + 188000 + 112000 = 696000 \text{ (грн)}$$

Річні капітальні затрати:

$$K_p = 0.17K \quad (3.6)$$

$$K_p = 0.17 \cdot 696000 = 118320 \text{ (грн/рік)}$$

Затрати на електроенергію електропривода:

$$Z_{\text{ел}} = \frac{1}{\mu_n} \cdot Z_{\text{вст}} \quad (3.7)$$

$$Z_{\text{ел}} = \frac{1}{0.97} \cdot 21900000 = 22577319.7 \text{ (грн/рік)}$$

Затрати на амортизацію системи електропривода:

$$Z_a = 0.1 \cdot K \quad (3.8)$$

$$Z_a = 0.1 \cdot 696000 = 69600 \text{ (грн/рік)}$$

Затрати на ремонт обладнання можна наблизено знайти за виразом:

$$Z_p = 0.02 \cdot K \quad (3.9)$$

$$Z_p = 0.02 \cdot 696000 = 13920 \text{ (грн/рік)}$$

Затрати на обслуговування можна наблизено знайти за виразом:

$$Z_o = 0.05 \cdot (Z_{\text{ел}} + Z_a + Z_p) \quad (3.10)$$

$$Z_o = 0.05 \cdot (22577319.7 + 69600 + 13920) = 1133042 \text{ (грн/рік)}$$

Приведені затрати на спорудження електропривода:

$$Z = K_p + Z_{\text{ел}} + Z_a + Z_p + Z_o \quad (3.11)$$

$$Z = 118320 + 22577320 + 69600 + 13920 + 1133042$$

$$= 23912202 \text{ (грн/рік)}$$

Всі вище отриманні данні вносимо в таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Економічний аналіз

Показники	Модернізація шафи	TPH
Вартість струмообмежуючого реактора, грн.	396000	
Вартість сист. керув./тирист. перетв., грн.	150000	2500000
Вартість робіт	150000	48890
Капітальні затрати, грн.	696000	2548890
Річні кап. затрати, грн./рік	118320	4333311
ККД системи, %	0.97	0.97
Затрати на електроен. грн./рік	22577320	22577320
Затрати на аморт., грн./рік	69600	254889
Затрати на ремонт, грн./рік	13920	50998
Затрати на обслугов., грн./рік	1133042	1144160
Приведені річні затрати, грн./рік	23912202	28360678

**Висновок.** Виконавши техніко-економічне порівняння розглянутих систем електроприводу, можна зробити висновок, що з економічної та технічної точки зору найкращим вирішенням проблеми буде модернізація шафи.

## 4 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

**4.1 Узагальнена структурна схема системи керування пуском та регулювання збудженням СД**

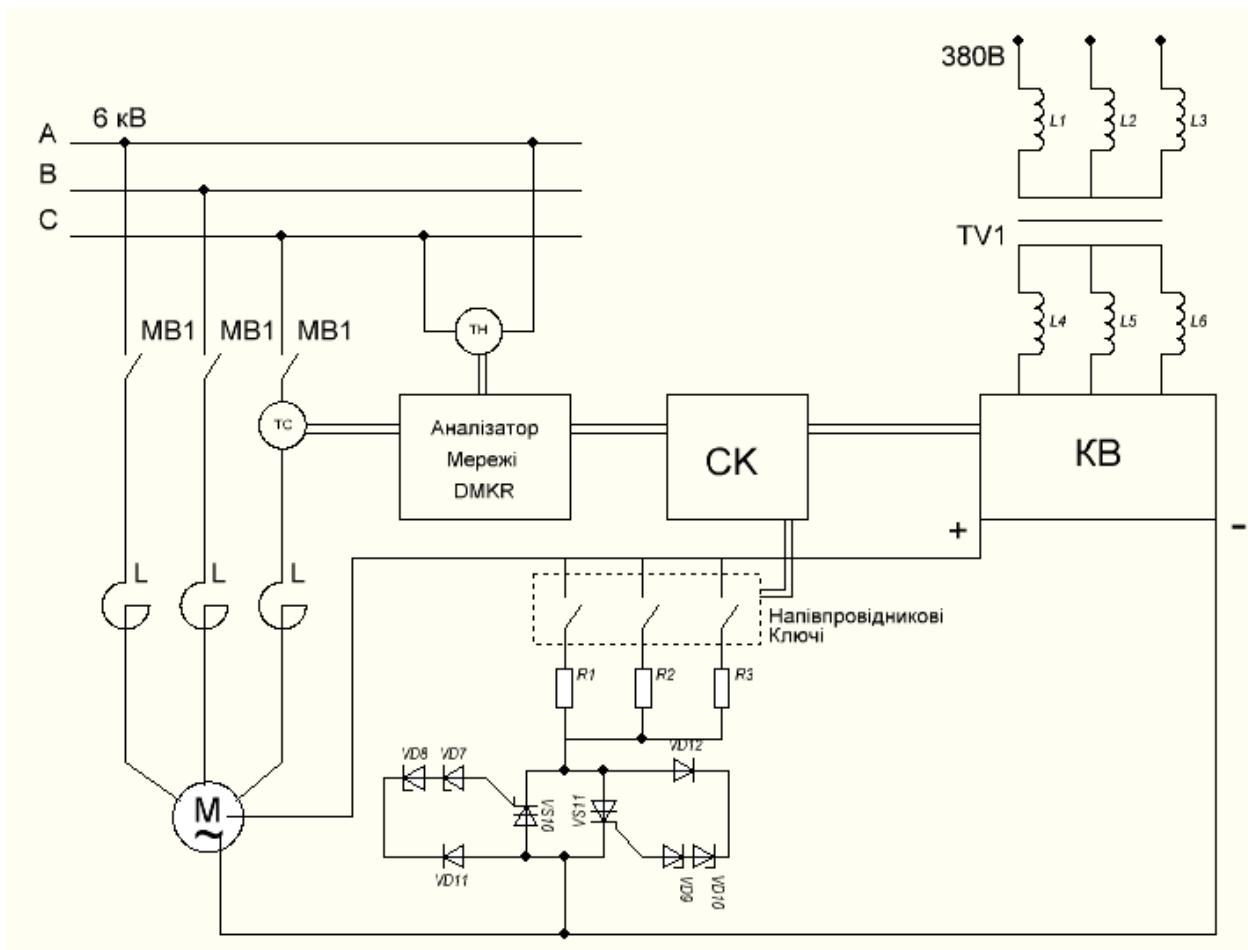


Рисунок 4.1 - Узагальнена структурна схема системи керування пуском та регулювання збудженням СД

На рисунку 4.1 зображена схема силових ланцюгів синхронного двигуна уже модифікована в якій ми вводимо в ході пуску в роторне коло опори, різні за значенням. Таким чином у ході пуску значення опору  $R_2'$  буде покроково змінюватись в залежності від стадії пуску – спочатку це значення буде більшим, і буде поступово знижуватись. Для реалізації описаного способу пуску, а також для регулювання струму збудження, ми обладнали систему приводу вимірювальним приладом у статорному колі, що має в

динамічному режимі фіксувати параметри споживаної енергії. Основними параметрами, які контролюються - напруга живлення статора, статорний струм, коефіцієнт потужності активна та реактивна енергія. Регулювання струму збудження реалізується як функція заданого значення реактивної потужності з обмеженням, що визначається номінальними значеннями струму статора та ротора.

#### 4.2 Попередній розрахунок силових кіл

Всі данні для розрахунку беремо з таблиці 1.

Розрахуємо пусковий струм:

$$I_{\text{пуск}} \geq 5.2 \cdot I_{\text{ном}} \geq 296.4 \text{ A} \quad (4.1)$$

Розрахуємо номінальний опір реактора

$$R_{\text{реакт.ном.}} = \frac{U_{\text{реакт}}}{I_{\text{реакт}}} = 0.262 \text{ Ом} \quad (4.2)$$

Додатковий опір у полі ротора:

$$R_d = 5 - 10R_{\text{реакт}} \quad (4.3)$$

Розрахунок індуктивності пускових реакторів

Повний активний опір реактора внутрішній пусковий опір (опір КЗ)

$Z_k$  – повний опір

$$Z_k = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск}}} = 11.687 \text{ Ом} \quad (4.5)$$

В пускових режимах основну роль мають індуктивні складові опору обмотки статора. В такому разі можна припустити, що :

$\varphi_k = 90^\circ$  тоді:

$$R_k = Z_k * \cos \varphi_k = 11.687 * 0 = 0 \text{ Ом} \quad (4.6)$$

$$X_k = Z_k * \sin \varphi_k = 11.687 * 1 = 11.687 \text{ Ом} \quad (4.7)$$

В даній роботі ми хочемо зменшити пусковий момент СД, тому для визначення покращення моменту використаємо відношення:

$$M = \frac{M_{\text{пуск реакт}}}{M_{\text{пуск пр.}}} = \frac{1}{2} \quad (4.8)$$

Де  $M=0.5$  – коефіцієнт бажаного зменшення пускового моменту

Визначимо кратність пускового струму:

$$a = \frac{I_{\text{пуск.реакт}}}{I_{\text{пуск.пр}}} \quad (4.9)$$

$$a^2 = \delta, \text{ а отже: } a = \sqrt{\mu} = \sqrt{0.5} = 0.707$$

$$X_{\text{peak}} = \sqrt{\frac{z_k^2}{r} - R_k^2 - X_k} = 4.841 \text{ Ом} \quad (4.10)$$

$$\Delta U_{\text{реакт}} = I_c * X = 57 * 5 = 285 \text{ кВ} \quad (4.11)$$

### **4.3 Побудова механічних характеристик синхронного двигуна в асинхронному режимі**

В практиці експлуатації синхронних машин бувають випадки, коли окремі машини випадають із синхронізму і їх ротори розпочинають обертатися відносно поля статора асинхронно, з деяким ковзанням  $S$ . Це відбувається в наслідок перенавантаження машин, значного падіння напруги в мережі і втрати збудження в результаті будь-яких несправностей в системі збудження або помилкового спрацювання автомата гасіння поля. Хоча не збуджена явно полюсна машина може розвивати в синхронному режимі певну потужність за рахунок реактивного моменту, звичайно ця потужність являється недостатньою для покриття навантаження, і тому явно полюсні машини при втраті збудження найчастіше також випадають із синхронізму.

При випадінні із синхронізму синхронна машина веде себе подібно асинхронною, але через відмінність конструкції ротора і наявності в загальному випадку струму збудження асинхронний режим синхронної машини має ряд особливостей.

Так як випадання синхронних машин із синхронізму при аваріях в енергосистемах відбувається нерідко, то виявлення особливостей асинхронного режиму і вияснення раціональних способів встановлення

нормальних режимів роботи мають значне практичне застосування.

Широко застосовується асинхронний пуск синхронних двигунів і компенсаторів, коли не збуджена машина підключається до мережі і її швидкість досягає майже синхронної швидкості подібно асинхронному двигуну.

Асинхронні режими роботи не збудженої і збудженої синхронної машини істотно відрізняються один від одного. Асинхронний режим збудженої синхронної машини являється більш складним, і його можна розглядати як накладення асинхронного режиму не збудженої синхронної машини короткого замикання синхронного генератора.

Розглянемо в першу чергу асинхронний режим роботи не збудженої синхронної машини.

Механічна характеристика синхронного двигуна в асинхронному режимі

$$M(s) = M_{\max} \frac{\frac{Z+q}{s - s_k + q}}{\frac{s_k}{s} + \frac{q}{s}}, \quad (4.12)$$

де

$$M_{\max} = \frac{U_0^2}{2\omega_0} * \frac{R_2}{Z_1} \quad (4.13)$$

$$s_k = \frac{R_2}{Z_1} \quad (4.14)$$

Схеми заміщення і їх параметри. Якщо б ротор синхронної машини мав магнітну і електричну симетрію, то робота цієї машини в асинхронному режимі без збудження нічим не відрізнялась б від роботи нормальної асинхронної машини.

Нехай обмотка якоря трьохфазної синхронної машини ввімкнена в мережу. Стуми якоря при цьому створюють обертове магнітне поле, що пересувається відносно несиметричного ротора зі швидкістю ковзання. Для аналізу явищ при несиметричному роторі розкладемо обертове відносно нього поле на два пульсуючих поля, одне з яких діє по повздовжній ( $d$ ), а

друге – по поперечній (q) осі ротора. Ці поля пульсують зі зсувом по фазі на 90 градусів, і частота їх пульсації:

$$f_2 = sf_1 \quad (4.15)$$

Окрім цього, як і в асинхронної машини, робочий процес синхронної машини в асинхронному режимі можна привести до еквівалентного процесу при нерухомому роторі. Далі можна уявити собі, що у такої машини з нерухомим ротором на статорі замість трьохфазної обмотки є еквівалентна двохфазна обмотка, причому одна фаза цієї обмотки створює магнітний потік, пульсуючий по повздовжній осі, а інша фаза – потік, пульсуючий по поперечній осі ротора, причому напруги цих фаз  $U$  і  $jU$  зсунуті по фазі на 90 електричних градусів. В подібній двохфазній системі взаємна індукція між фазами відсутня і явища по осям  $d$  і  $q$  можна розглядати незалежно один від одного. В результаті замість однієї схеми заміщення для симетричної асинхронної машини для синхронної машини отримуємо дві схеми заміщення – одну для повздовжньої і іншу для поперечної осі.

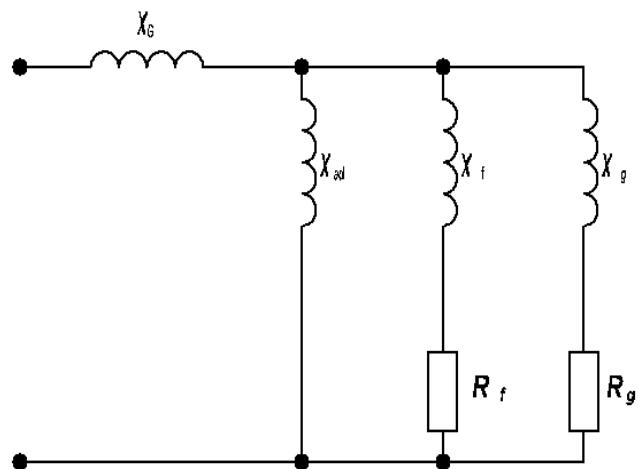


Рисунок 4.2 – Схема в  $d$  осі ротора

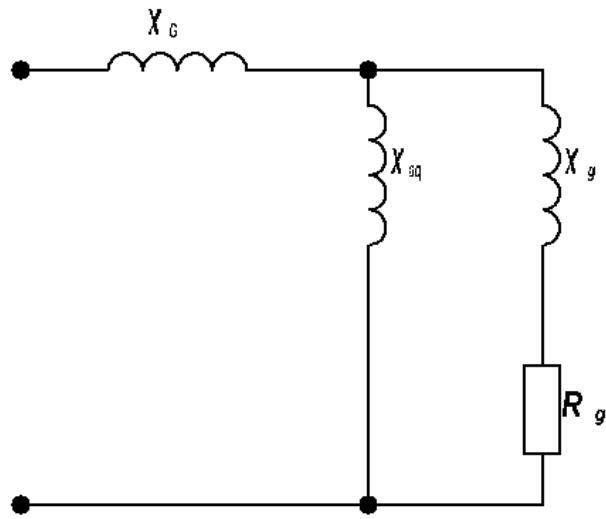


Рисунок 4.3 – Схема в  $q$  осі ротора

При наявності демпферної або пускової обмотки в схемі для повздовжньої осі мають два вторинних ланцюги, як і в двох кліткового асинхронного двигуна, а в схемі для поперечної осі – один вторинний ланцюг. При відсутності зазначених обмоток число вторинних ланцюгів зменшується на одиницю. На схемах прийнято  $r_a = 0$  і не враховується втрати в сталі ротора. При наявності в ланцюзі збудження додаткового супротиву (наприклад, супротив гасіння поля) його значення має вмикатися в  $r_f$ .

В основі розгляду явищ згідно рис 1 і схеми 2 лежить уявлення про двохфазну машину. Але, щоб запобігти введення в розгляд нових параметрів, будемо думати, що опір, уявляє з себе параметри  $m$ -фазної машини. Водночас з тим будемо вважати, що прикладені до двохфазної обмотки 1 та схем 2 напруги є фазними напругами реальної  $m$ -фазної обмотки (зазвичай  $m=3$ ). При цьому струми  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$  будуть відповідати струмам  $m$ -фазної обмотки. Наприклад, якщо в певний момент часу вісь одної з фаз обмотки якоря буде співпадати з віссю  $d$ , то в цій фазі буде протікати струм  $I_{ds}$ . Та обставина, що аналіз явищ на основі рис 1 – 2 звязується з поданням про

двохфазну машину, а  $U$ ,  $I$ ,  $Z$  відповідає фазам т-фазної машини, враховується нижче при обрахунку моментів і потужностей.

Опір синхронної машини по осям  $d$  і  $q$  в асинхронному режимі  $Z_{ds}$ ,  $Z_{qs}$  являє собою опір схем рис. 2 і являється функціями ковзання  $S$ .

Значення струмів і обертових моментів. Відповідно до викладеного та рисунків 1 та 2 повздовжній та поперечний струми якоря при асинхронному режимі:

$$I_{ds} = \frac{U}{Z_{ds}}; \quad (4.16)$$

$$I_{qs} = \frac{-jU}{Z_{qs}} \quad (4.17)$$

Так як  $Z_{ds} \neq Z_{qs}$ , то струми  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$  складають несиметричну двохфазну систему і їх можна розкласти на струми прямої і зворотної послідовності:

$$I_1 = \frac{I_{ds} + jI_{qs}}{2} = \left( \frac{1}{Z_{ds}} + \frac{1}{Z_{qs}} \right) * \frac{U}{2}; \quad (4.18)$$

$$I_2 = \frac{I_{ds} - jI_{qs}}{2} = \left( \frac{1}{Z_{ds}} - \frac{1}{Z_{qs}} \right) * \frac{U}{2} \quad (4.19)$$

Струми  $I_1$  та  $I_2$  створюють синхронну швидкість і магнітні поля прямої і зворотної послідовності, обертове залежно ротора відповідно зі швидкостями  $sn_1$  і  $-sn_1$ , де  $n_1$  – синхронна швидкість, а відносно статора зі швидкостями:

$$n_1c = n + sn_1 = (1 - s) * n_1 + sn_1 = n_1$$

$$n_2c = n - sn = (1 - s) * n_1 - sn_1 = (1 - 2s) * n_1$$

Так як синхронна швидкість струмів  $I_2$  статора обертається відносно статора зі швидкістю  $n_2c$ , яка відрізняється в  $(1-2s)$  раз від синхронної швидкості, то частота струму  $I_{2c}$  в обмотках статора:

$$f_{2c} = (1 - 2s) * f_1;$$

в той час як основна частота струмів  $I_1$  рівна  $f_{1c} = f_1$ . Таким чином, струми обмоток статора мають складові різних частот, тобто вони не синусоїдальні. Це цілком природно, так як внаслідок обертання несиметричного ротора відносно нерухомих фаз обмотки статора еквівалентні опори цих фаз з урахуванням впливу ротора непостійні і тому при додатку синусоїдних напруг струми будуть не синусоїдальні.

Зазначимо, що частота струмів  $I_2$  рівна основній частоті при  $S=1$  і  $S=0$ . В першому випадку ротор нерухомий і тому опір фаз хоча і різний, але постійні по значенню в результаті чого струми фаз не рівні по значенню, але синусоїдальні. В другому випадку (синхронний режим), згідно схемам рис 2

$Z_{ds} = jX_d$  і  $Z_{qs} = jX_q$ , так як вторинні ланцюги цих схем розімкнені.

При цьому  $I_{ds}$  і  $I_{qs}$  рівні по повздовжній  $I_d$  і поперечній  $I_q$  що становлять струму якоря  $I$ .

Отримані тут результати цілком відповідають розглянутому режиму роботи асинхронного двигуна з несиметричним ротором, і до цього останньому випадку застосовані також всі розглянуті тут кількісні співвідношення. В двох випадках внаслідок несиметрії ротора виникає зворотно обертове відносно ротора поле струмів  $I_2$  і струми частоти  $(1-2s)f_1$  в статорі.

Так як ми знехтували втратами в статорі, то потужність  $P_1$ , відповідає струмам  $I_1$ , повністю передається на ротор, являється електромагнітною потужністю і створює обертовий момент  $M_1$ . Ця потужність в т-фазній машині:

$$P_1 = MUI_{1a} \quad (4.20)$$

де  $I_{1a}$  – активна складова струму  $I_1$ .

$$I_{1a} = \frac{1}{2} * (I_{dsa} + I_{qsa}) = \frac{1}{2} * (I_{ds} * \cos\beta_{ds} + I_{qs} * \cos\beta_{qs}) = \frac{1}{2} * \left( \frac{I_{ds}(rds)}{Z_{ds}} + \frac{I_{ds}(rqs)}{Z_{qs}} \right) \quad (4.21)$$

де

$$I_{ds} = \frac{U}{Z_{ds}}; \quad (4.22)$$

$$I_{qs} = \frac{U}{Z_{qs}} \quad (4.23)$$

Являються модулями струмів  $I_{ds}$  і  $I_{qs}$ .

Після підстановки  $I_{1a}$  і врахування рівностей отримаємо:

$$P_1 = \frac{m}{2(I^2 ds * rds + I^2 qs * rqs)} \quad (4.24)$$

Відповідно обертовий момент:

$$M_1 = \frac{pP_1}{w_1} = \frac{pm}{2w_1} * (I^2 ds * rds + I^2 qs * rqs) \quad (4.25)$$

Магнітне поле струмів  $I_2$  створює обертовий момент  $M_2 \neq 0$  тільки тоді, коли опір обмотки статора  $r_a \neq 0$ , так як в відношенні цього поля ротор являється первинною, а статор – вторинною стороною:

$$I_1 = \frac{(Z_{ds} + Z_{qs} - \frac{2ra}{1-2s}U)}{(Z_{ds} + ra)(Z_{qs} - \frac{ra}{1-2s} + (Z_{qs} + ra)(Z_{ds} - \frac{ra}{1-2s}))} \quad (4.26)$$

Момент, створюваний струмами  $I_2$

$$M_2 = \frac{p_m}{w_1} * I^2 * \frac{r_a}{1-2s} \quad (4.27)$$

Окрім цього, при  $r_a \neq 0$  в межах  $s \approx 0.5$ , виникає провал результуючого моменту  $M_a$ . При  $r_a = 0$ ,  $M_2 = 0$ ,  $M_a = M_1$

Якщо машина має повну демпферну або пускову обмотку, масивний ротор або масивні полюси з між полюсними перемичками, то параметри машини по різних осіях при ковзанні  $s \geq 0,05$  близькі один до одного:

$$Z_{ds} \approx Z_{qs} X_d \approx X_q \quad (4.28)$$

В таких випадках на основі виразів  $I_{ds} \approx I_{qs}$  і  $I_2 \approx 0$ . Асинхронний режим тому і являється майже симетричним  $M_2 = 0$  і одноосний ефект майже не проявляється. В наслідок чого в розглянутому випадку можна покласти  $r_a \approx 0$  і розв'язати струми і момент. При відсутності демпферної або пускової обмотки і при шихтованому роторі опори  $Z_{ds}$  і  $Z_{qs}$  відрізняються один від одного значно. Тому в цьому випадку одноосний ефект проявляється сильно.

Розглянуті обертові моменти мають при  $S = \text{const}$  незмінні значення і знаки, окрім цих моментів; при  $Z_{ds} \neq Z_{qs}$  в результаті взаємодії обертових відносно один від одного прямого і оберненого полів виникає знакозмінний момент, пульсуючий з частотою  $2sf_1$ . При великій частоті пульсації цей момент не впливає на рух ротора, але при  $-0.02 < s < 0.02$  ротор змінно прискорюється і сповільнюється і його швидкість обертання буде змінюватися. При  $s = 0$  цей момент перетворюється із пульсуючого в постійний і представляє з себе реактивний момент, відповідний останньому члену рівності.

Комплексний опір  $Z_d$

$$\underline{Z}_{ds} = R_1 + X_G + \frac{1}{\frac{1}{JX_{ad}} + \frac{1}{R_f + JX_f} + \frac{1}{R_g + JX_g}} \quad (4.29)$$

$$R_f = R_{f0} + R_g \quad (4.30)$$

$$R_{f0} = 0,262 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_{qs} = R_1 + jX_G + \frac{1}{\frac{1}{jX_{aq}} + \frac{1}{R_g + jX_g}} \quad (4.31)$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{Z}{z_{ds} + z_{qs}} \quad (4.32)$$

$$R_2 = R_e(\underline{Z}_1)$$

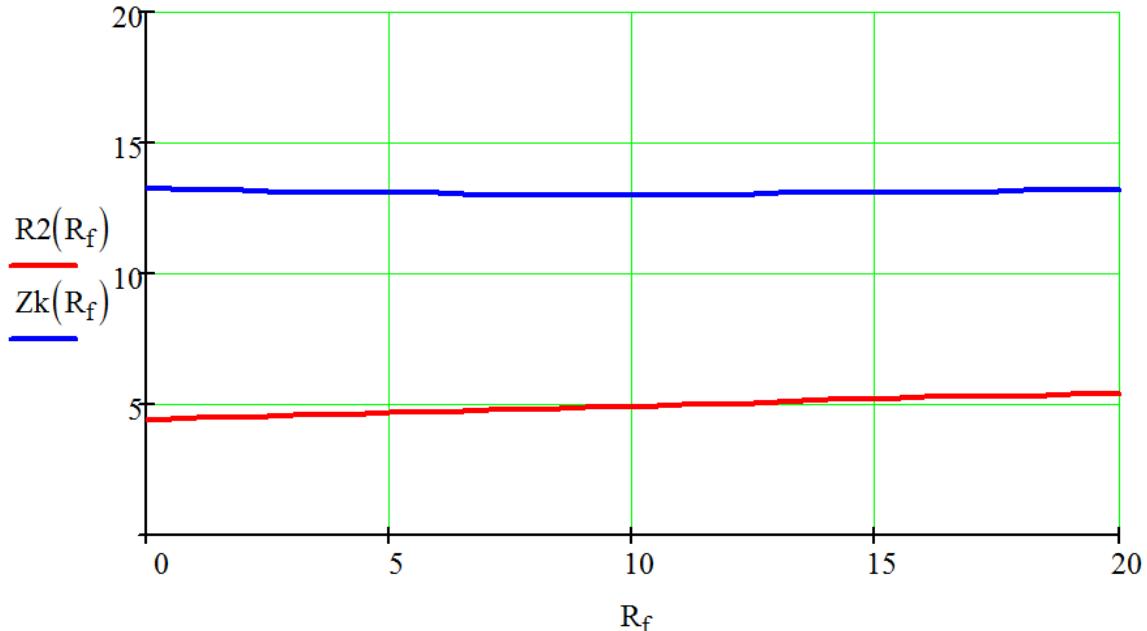


Рисунок 4.4 – Залежність опорів схеми заміщення від значення додаткового опору

Механічна характеристика синхронного двигуна в асинхронному режимі

$$M(s) = M_{max} \frac{Z+q}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q} \quad (4.33)$$

де

$$M_{max} = \frac{U_0^2}{2\omega_0} * \frac{R_2}{Z_1} \quad (4.34)$$

$$S_k = \frac{R_2}{Z_1} \quad (4.35)$$

Для того щоб визначити пусковий момент:

$$n = 0 \Rightarrow s = 1$$

$$M_{пуск} = M(s=1) = M_{max} \frac{Z+q}{\frac{1}{s_k} + S_k + q} \quad (4.36)$$

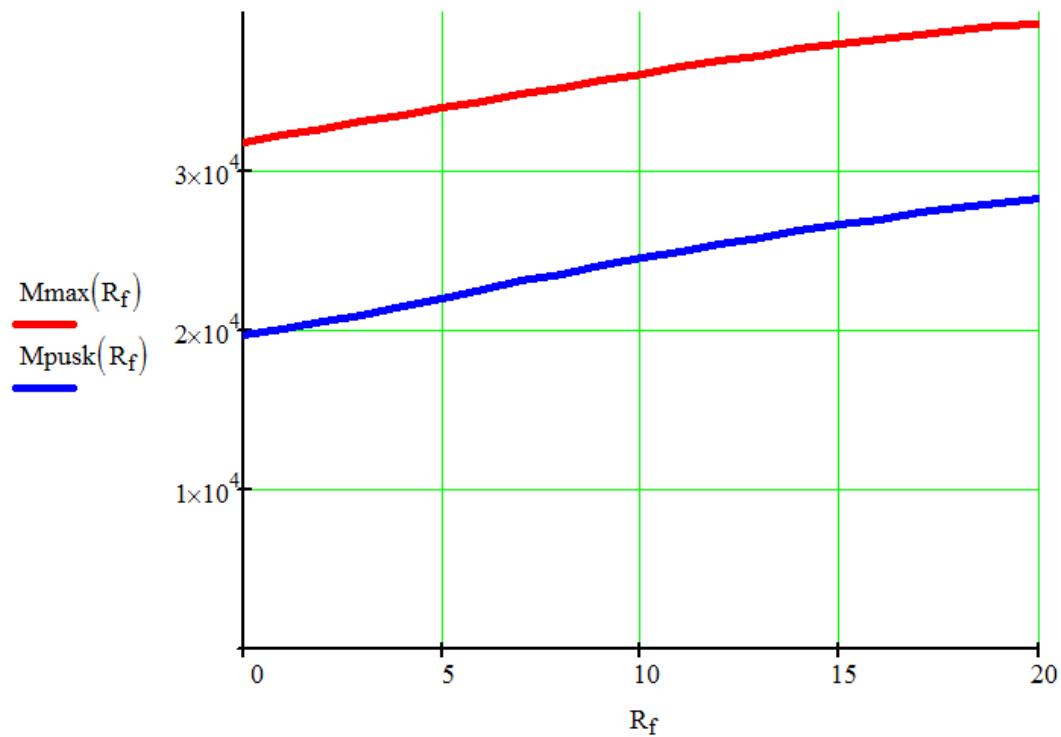


Рисунок 4.5 – Залежності пускового і максимального моментів від значення додаткового опору

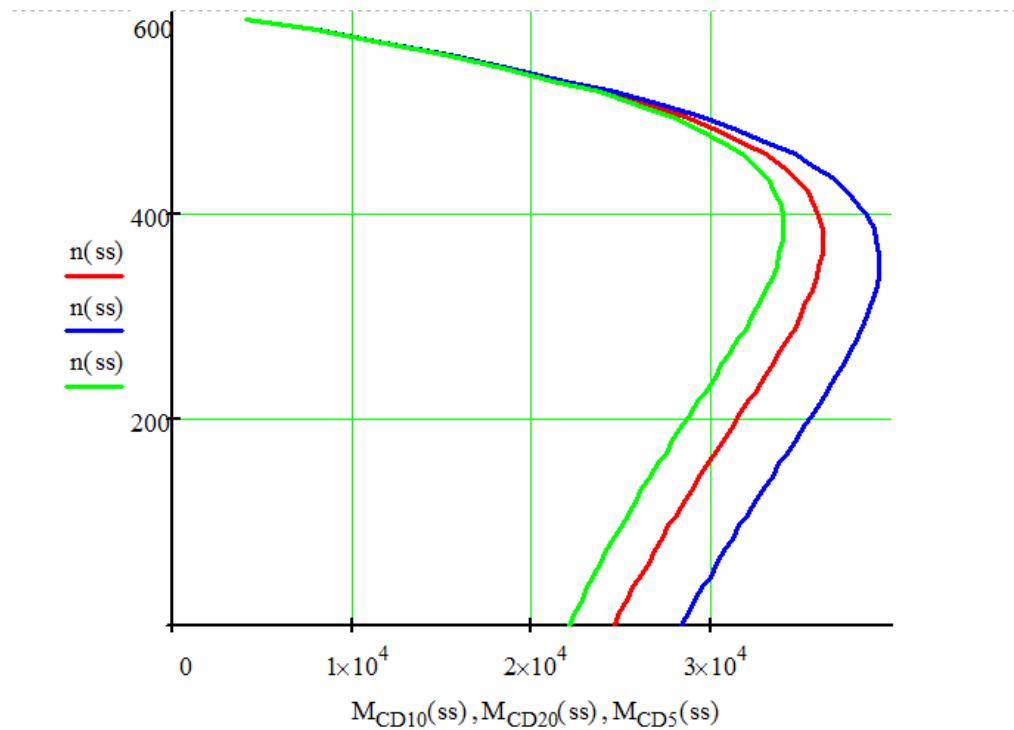


Рисунок 4.6 – Механічна характеристика при різних значеннях додаткового опору

Розрахунок механічних характеристик з реакторами:

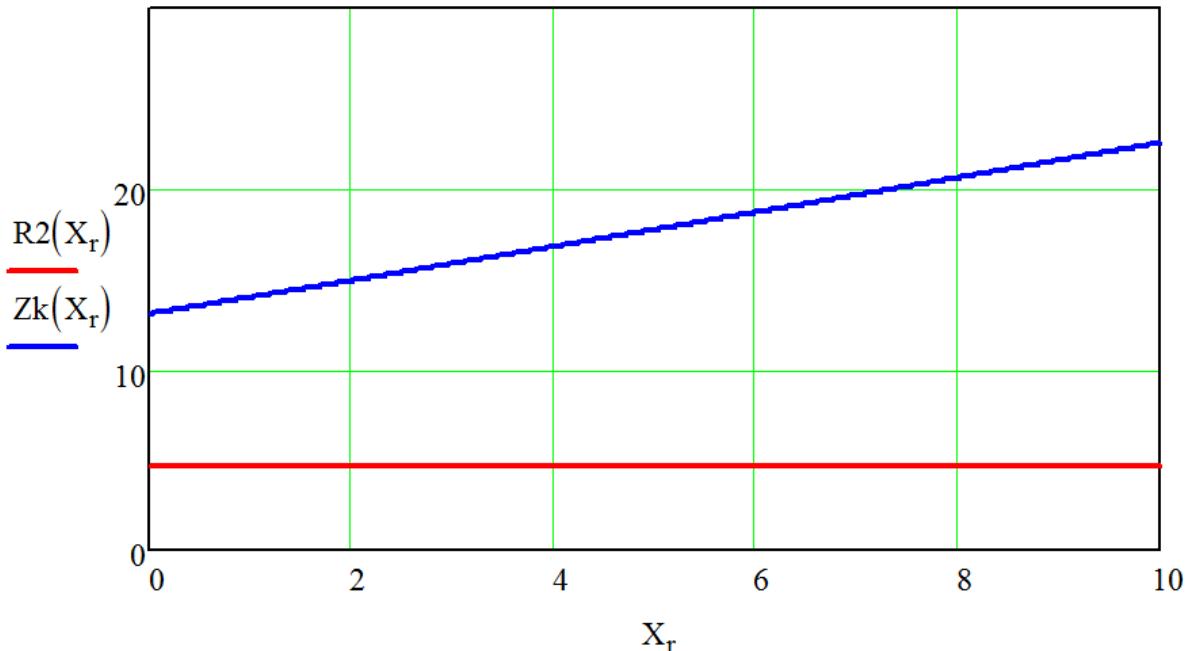


Рисунок 4.7 – Залежність опорів схеми заміщення від значення реактивного опору

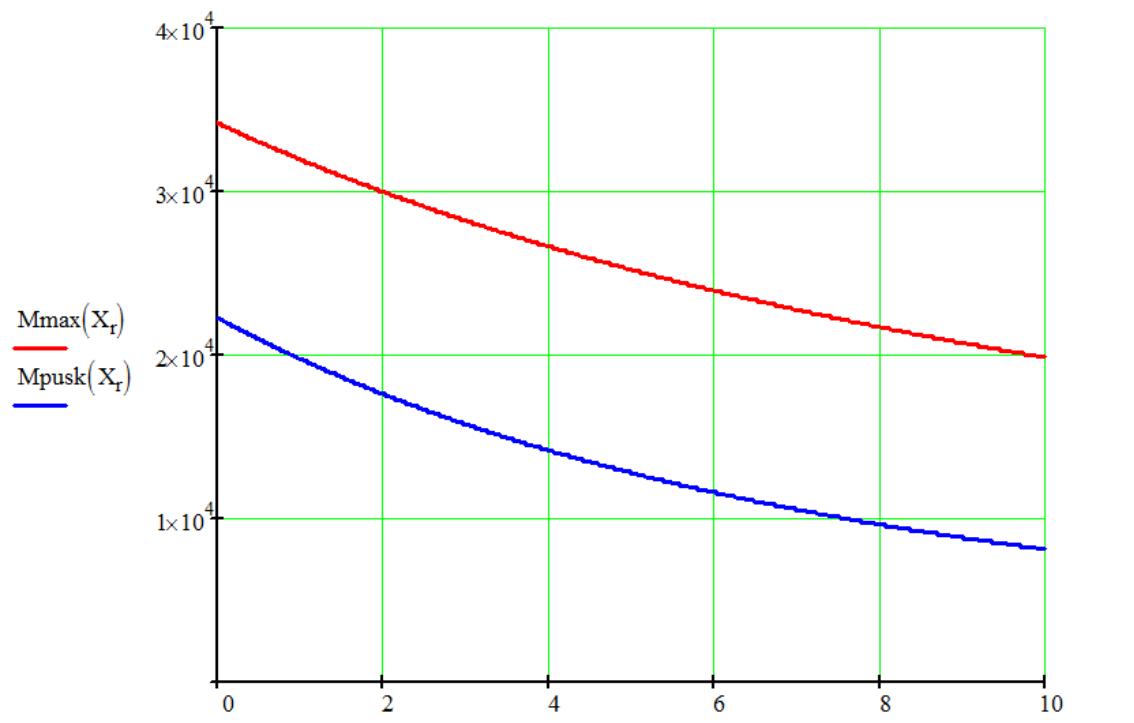


Рисунок 4.8 – Залежності пускового і максимального моментів від значення реактивного опору

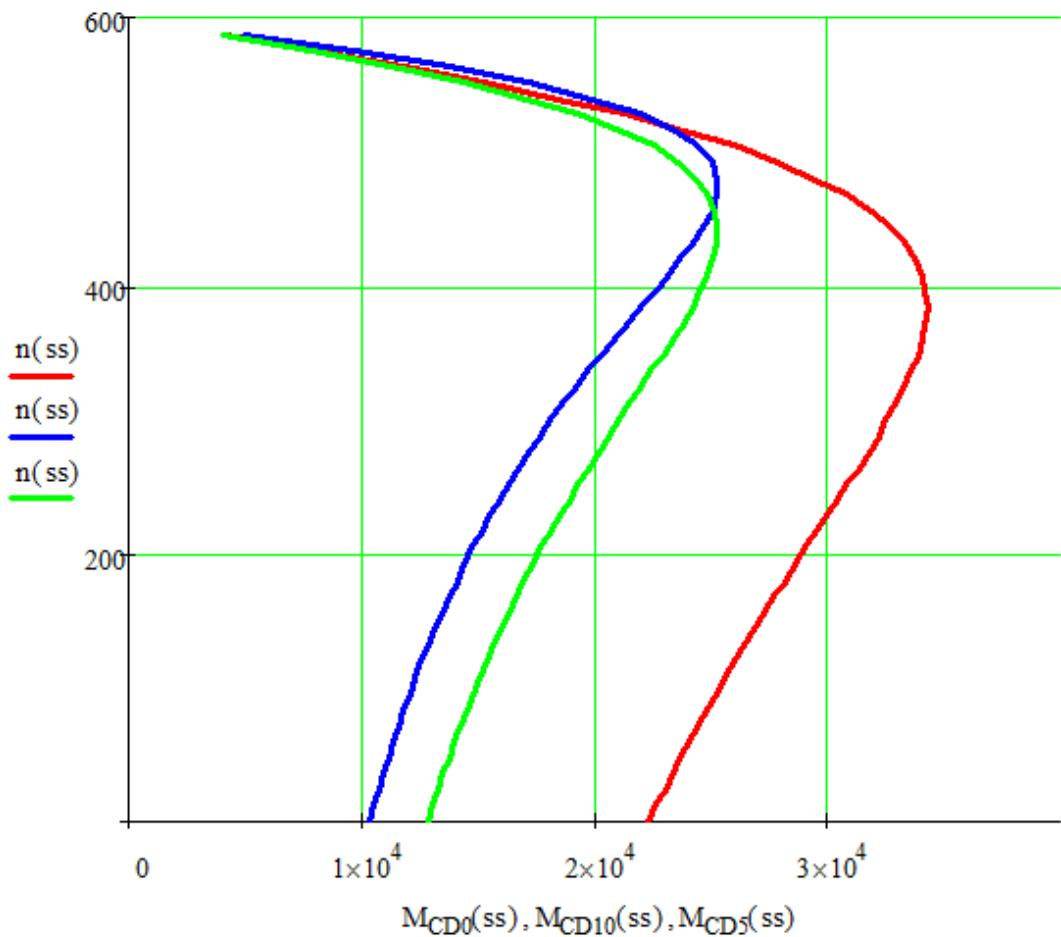


Рисунок 4.9 – Механічна характеристика з реакторами при різних значеннях реактивного опору

$$\Delta U = I_{ct} * X_{peak} = 57 * 5 = 285 \text{ В}$$

$$U_{dB} = \frac{U_{ct,nom} - \Delta U}{U_{ct,nom}} \geq 95\%$$

То вважаємо що СД може постійно працювати разом із реактором

Розрахунок силових кіл регулятора збудження

$$U_f = \frac{W}{N} K * f_0 * Q_m = 0$$

$$(1 - S) * f_0$$

$$f = S * f_0$$

$$U_f = 500 \text{ V}$$

$$\frac{500}{5} = 100 \text{ A}$$

**Висновок.** В розділі «Методи та засоби обмеження пускових режимів» було розроблено узагальнену структурну схему від якої можна далі відштовхуватись для побудови повноцінної схеми; проведений попередній розрахунок силових кіл з якого стало відомо, що додатковий опір  $R_d = 5 \text{ Ом}$  та опір ректора  $R_x = 5 \text{ Ом}$

$R_{\text{реакт}} = 5 \text{ Ом}$ ; побудовано механічні характеристики в асинхронних режимах роботи синхронного двигуна з яких видно, що пусковий момент зменшився.

## 5 ВИБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 5.1 Вибір обладнання силових кіл статора та ротора

Реактори в Україні сьогодні виготовляє 1 підприємство, а саме ТОВ «ЕЛІЗ», яке знаходиться в місті Запоріжжя.



**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЕЛІЗ»  
ТОВ «ЕЛІЗ»**



вул. Звенигородська, 9, м. Запоріжжя, 969093, тел. (061) 239-54-45

e-mail: opb@eliz.zp.ua [www.eliz.zp.ua](http://www.eliz.zp.ua)

Код за ЄДРПОУ 13608660

На Ваш № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ г.  
Исх. № 473 от 02.04.2024 г.

**ПРАТ "КРИЖОПІЛЬСЬКИЙ ЦУКРОВИЙ  
ЗАВОД"**

Шановний [REDACTED]

Повідомляємо, що ТОВ «ЕЛІЗ» має можливість виготовити і поставити на Вашу адресу наступне електрообладнання:

№	Наименование оборудования	Ед. изм.	Кол-во.	Цена в грн. с НДС	Сумма в грн. с НДС
1	Реактор РТСТ-6-150-2,5-5 УЗ	шт.	1	396 000,00	396 000,00
<b>ИТОГО с НДС:</b>					<b>396 000,00</b>

- Умови оплати: 70 % передоплата, 30 % оплата протягом 5 (п'яти) банківських днів з моменту повідомлення про готовність.
- Гарантійний термін: 36 місяців з моменту введення в експлуатацію, але не більше 42 місяців з моменту відвантаження заводом-виробником.
- Термін виготовлення: уточнюється додатково.
- Рік випуску: 2024 р
- Термін дії комерційної пропозиції: 20 календарних днів.



Рисунок 5.1 – комерційна пропозиція

Тому вибираємо реактор РТСТ-6-159-2.5-5 УЗ

Розглянемо особливості роботи однотактного трьохфазного керованого випрямляча. Тиристори випрямляча увімкнуті послідовно у вторинні обмотки трансформатора. Тому робочим є тільки один півперіод фазної напруги цих обмоток. Саме за цієї причини випрямляч класифікується як однотактний. Це означає, що струм вторинних обмоток є пульсуючим і має нульову гармонічну складову, яка створює постійне магнітне поле, що підмагнічує осердя трансформатора. Таке додаткове підмагнічування негативно впливає на його роботу, викликаючи перегрівання обмоток та зростання втрат в осерді. Для запобігання зростанню додаткових втрат, встановлена потужність трансформатора повинна на 30-40% перевищувати потужність навантаження, що є головним недоліком випрямляча.

Оскільки катоди усіх діодів з'єднані між собою струмопровідною шиною і їхній потенціал за будь-яких умов залишається однаковим, то це означає, що кожен з діодів буде вмикатись лише на тому відрізку часу, на якому потенціал його аноду набуватиме найвищого значення. На рисунку 2,а,б ці інтервали позначені відрізками  $0_10_2$ ,  $0_20_3$  та  $0_30_4$ . Тривалість кожного інтервалу складає третину періоду і в сумі вони формують повний період випрямленої напруги. Тобто ця напруга має три пульсації кожна з яких формується частиною позитивного півперіоду фазної напруги вторинних обмоток трансформатора середнє значення визначається з виразу:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \cdot 3 \cdot \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}U_{2\phi} \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{2\phi} (\sin \theta) \Big|_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{2\phi} 2 \sin \frac{\pi}{3} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_{2\phi} \approx 1.17 U_{2\phi}$$

де:  $U_{2\phi}$  - діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Дане співвідношення отримане за умови суміщення початку відрахунку з амплітудою однієї з пульсацій випрямленої напруги. Коефіцієнт «три» перед інтегралом визначає кількість таких пульсацій на періоді.

За умови активного навантаження форма струму (рис. 2 в) буде

повторювати форму випрямленої напруги, а через діод та вторинну обмотку трансформатора (рис.2 д) протікає струм протягом відповідної третини періоду. У закритому стані до діода VD1 через відкриті на відповідному проміжку діоди VD2 та VD3 будуть прикладатись лінійні напруги  $u_{ab}$  та  $u_{ac}$ .

Як видно зі схеми рис. 3 керований випрямляч реалізується шляхом заміни звичайних діодів на керовані діоди – тиристори. Додатково потрібно використовувати спеціальну систему імпульсно – фазового керування (СІФК), в завдання якої входить генерація імпульсів вмикання тиристорів. Трифазний однотактний керований випрямляч як правило використовується для живлення низьковольтного навантаження, тому комплектується з понижувальним трансформатором.

Принцип роботи такого перетворювача базується на зміні моментів вмикання тиристорів. За таких умов до навантаження буде прикладена тільки частина робочих півперіодів мережі живлення, як це зображено на рис.4,б. Тобто при зміні моменту вмикання тиристорів, площа півперіодів, які формують напругу на навантаженні, буде змінюватись. Тим самим буде змінюватись середнє значення випрямленої напруги, а також, як наслідок, величина струму навантаження. Таким чином, керований випрямляч зміщує дві функції – випрямлення та регулювання рівня напруги та струму в колі навантаження.

Виходячи з особливостей роботи трифазного випрямляча, слід розглядати два інтервали зміни кута  $\alpha$ . Перший з них, забезпечує режим безперервного формування випрямленої напруги і обмежений інтервалом:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{6}$$

На другому інтервалі у вихідній напрузі з'являються нульові проміжки і вона та струм навантаження стають переривчастими. Такий режим спостерігається при кутах:

$$\alpha > \frac{\pi}{6}$$

Відповідно середнє значення випрямленої напруги на обох інтервалах буде по різному залежати від кута  $\alpha$ . На першому з них:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha$$

де:  $U_{d0}$  - середнє значення напруги при  $\alpha = 0^\circ$  ел

На другому інтервалі, коли  $\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$ ,

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)}{\sqrt{3}}$$

За умови активного навантаження струм у навантаженні має таку саму форму, що й випрямлена напруга.

Знайдемо діюче значення напруги на вторинній обмотці трансформатора:

$$U_{2\phi} = 81 \text{ (B)}$$

Знайдемо середнє значення випрямленої напруги на навантаженні в некерованому режимі роботи:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cdot U_{2\phi} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cdot 81 = 94.7 \text{ (B)}$$

Номінальний струм навантаження яким є обмотка збудження:

$$I_d = I_{\text{пот}} = 164 \text{ (A)}$$

Визначимо активний опір навантаження використовуючи закон Ома:

$$R_f = \frac{U_{f\text{ном}}}{I_{f\text{ном}}} = \frac{43}{164} = 0.262 \text{ (Ом)}$$

Номінальне значення напруги обмотки збудження:

$$U_{f\text{ном}} = 43 \text{ (B)}$$

Регулювальна характеристика для активно-індуктивного навантаження:

$$U_{f\text{ном}} = U_{d0} \cdot \cos \alpha$$

$$43 = 94.7 \cdot \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = 0.454$$

$$\alpha = 63^\circ$$

Що для здійснення регулювання струму збудження  $\alpha$  від тах змінюватись у межах від  $63^\circ$  до  $90^\circ$

Тиристор вибирається за максимальним струмом:

$$I_{\max} \geq I_{f_{\text{nom}}} = 164\text{A}$$

Та за максимальною зворотною напругою:

$$U_{R_{\max}} \geq U_{2L} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = 198 \text{ (B)}$$

Тому обираємо систему керування KB Exilogic TE4.

## 5.2 Вибір елементів системи керування

Аналізатор мережі DMKR:

Пристрій DMKR – цифровий пристрій релейного захисту та автоматики, який виконує функції :

- Захисту;
- Управління;
- Телемеханіки;
- Аналізу якості електроенергії;
- Візуалізації;
- Лічильників електроенергії;
- Осцилографа, з можливістю запису і перегляду осцилограм та векторних діаграм;
- Лічильник часу напрацювання об'єкту;

Призначений для використання в схемах релейного захисту і протиаварійної автоматики приєднань 0,4  $\div$  110 кВ. Може використовуватись для установки на нових і реконструйованих підстанціях промислових установок і розподільних мереж, для заміни старих релейних засобів автоматики.

DMKR може встановлюватися в релейних відсіках КРУ, на панелях, в шафах на пультах управління, а також в релейних шафах зовнішньої

установки на ВРУ. Пристрій може використовуватись як самостійний, так і разом з іншими пристроями релейного захисту.

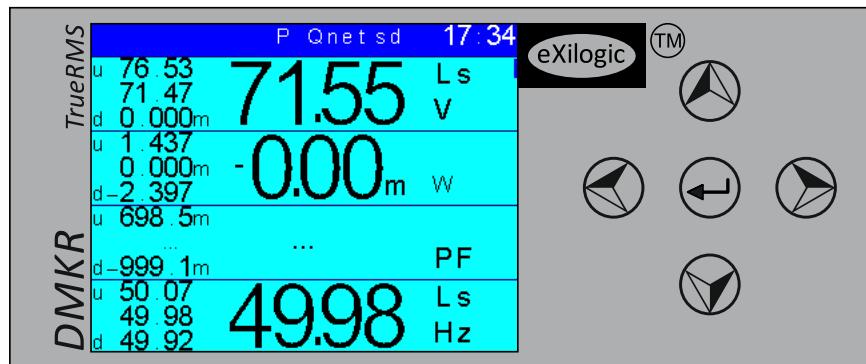


Рисунок 5.2 - Зовнішній вигляд передньої панелі пристрою DMKR

Функції пристроя:

Цифровий пристрій DMKR надає можливості гнучкого налаштування та реалізації наступних функцій:

Захисту

- Максимальний струмовий захист (MC31, MC32, MC33) з витримкою часу.
- Максимальний струмовий захист (MC3H1, MC3H2, MC3H3) з блокуванням по напрузі та витримкою часу
- Направлений максимальний струмовий захист (HMC31, HMC32, HMC33) з витримкою часу/без витримки часу.
- Струмова відсічка (CB1, CB2, CB3) з витримкою часу/без витримки часу;
- Захист від підвищення та пониження частоти (ЧЗ1, ЧЗ2, ЧЗ3) з витримкою часу/без витримки часу;
- Віртуальне реле (BP1-BP16).

Управління і телемеханіка

- Індикація дискретних входів/виходів.
- Реєстратор аварійних подій.
- Інтерфейс RS 485 (Протокол Modbus RTU).

Вимірювання

- Вимірювання фазної та лінійної напруги.
- Вимірювання фазних струмів.
- Розрахунок струму нульової послідовності.
- Розрахунок активної потужності.
- Розрахунок реактивної потужності.
- Розрахунок повної потужності.
- Вимірювання коефіцієнта потужності.
- Вимірювання частоти.
- Вимірювання струму і напруги прямої та зворотної послідовності.
- Облік активної/реактивної енергії (імпорт/експорт).

На рисунку нижче відображені функціональні можливості приладу згідно міжнародного стандарту IEEE C37.2-2008, з кодами релейного захисту по ANSI.

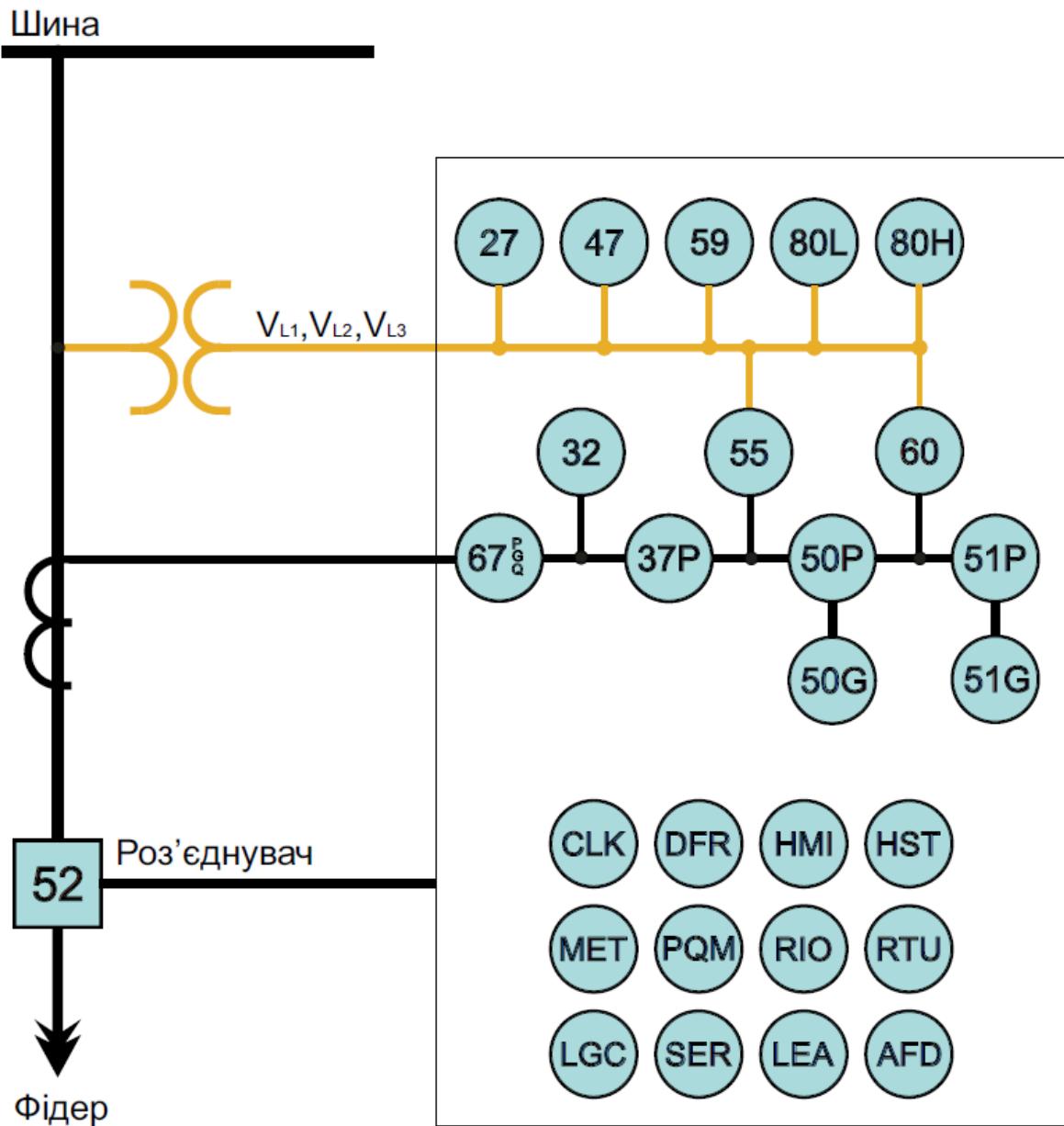


Рисунок 5.3 - Функціонал приладу згідно стандарту IEEE C37.2-2008.

### Система керування керованим випрямлячем

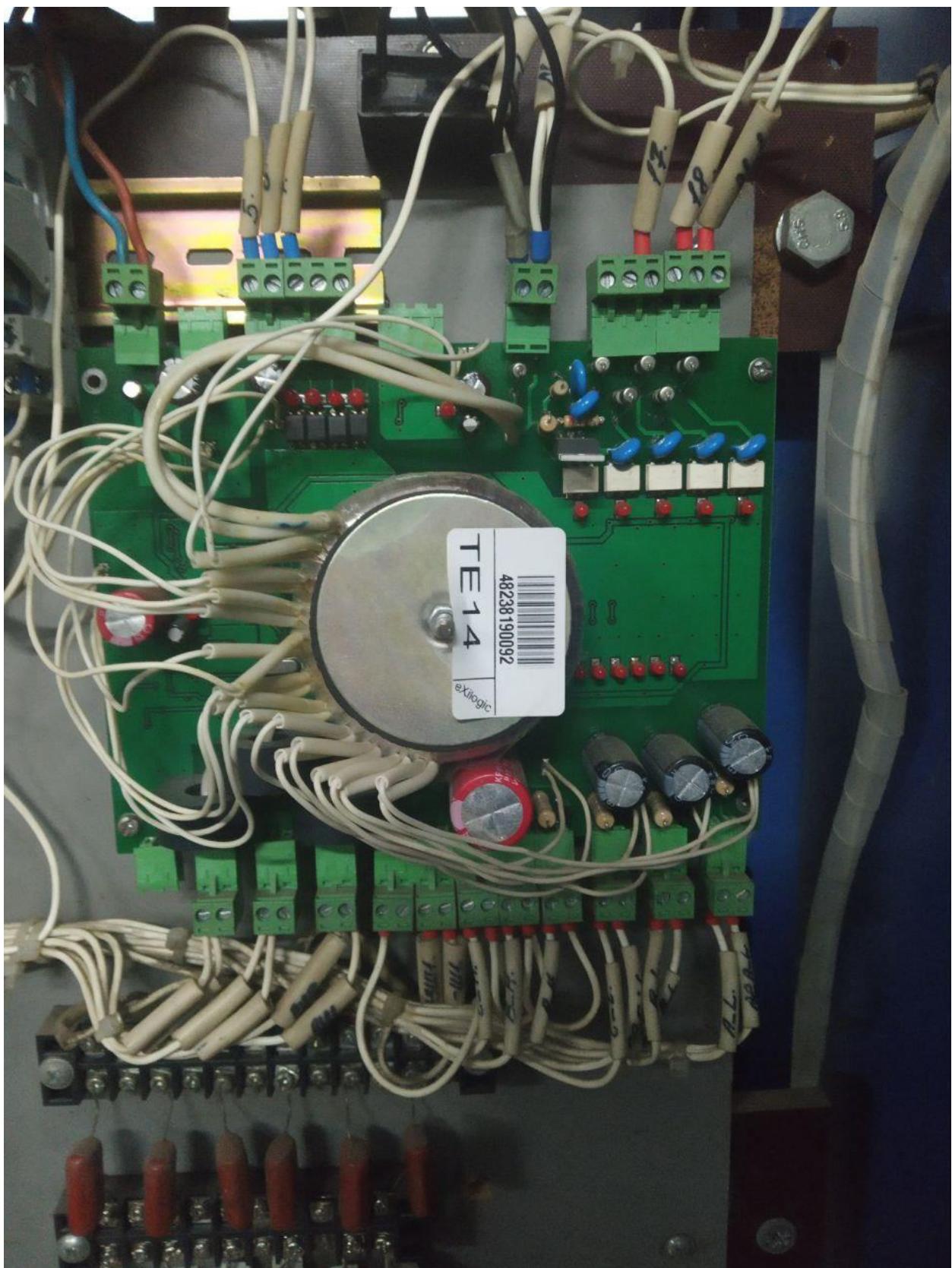


Рисунок 5.4 – Фото системи керування керованим випрямлячем

Система керування KB Exilogic TE4 – серія випрямлячів, які інтегруються в систему керування через RS485 з підтримкою Modbus RTU.

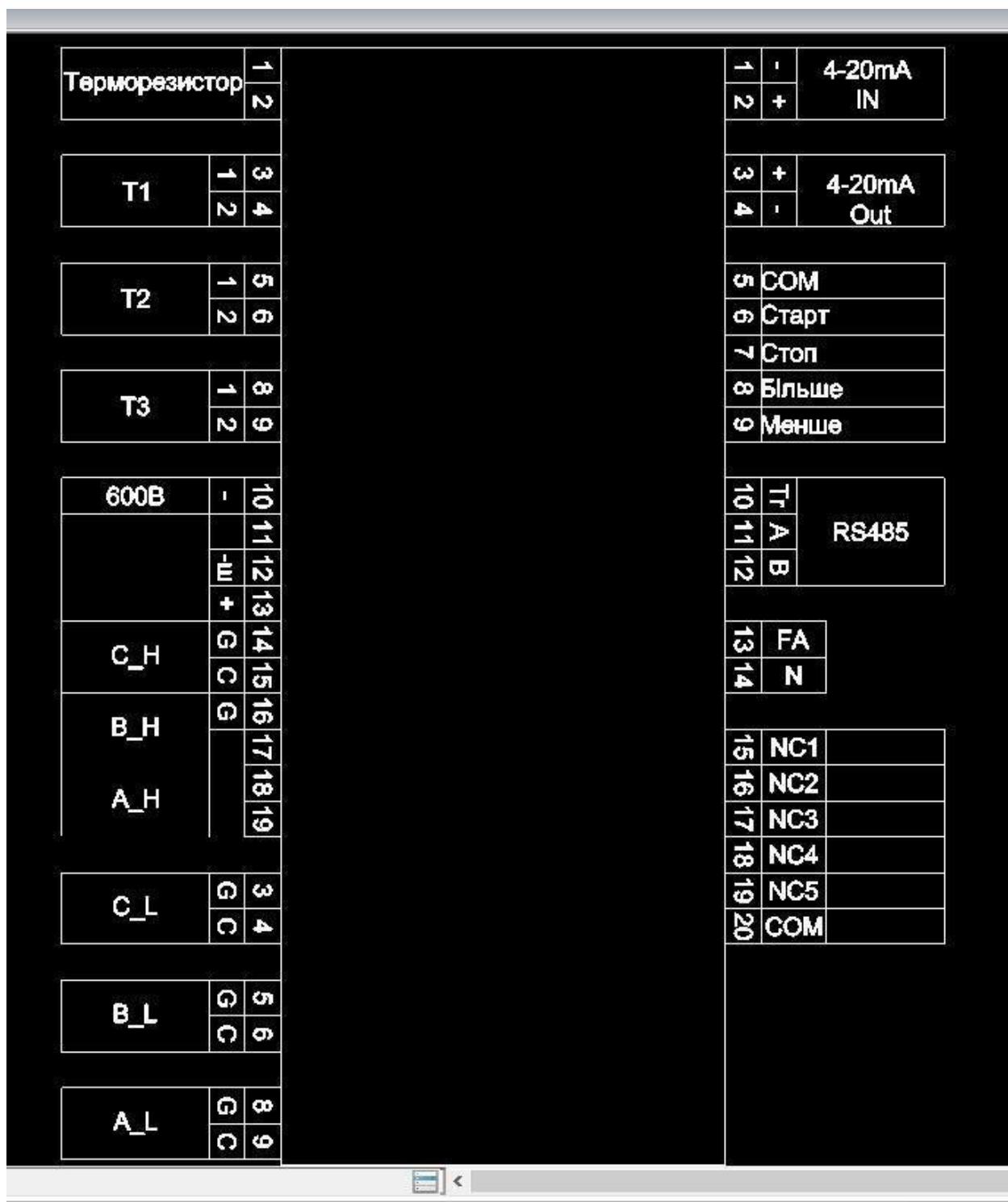


Рисунок 5.5 – клеми для підключення живлення та мережі RS485

Для підключення системи керування керованими випрямлячами необхідно: з порту DMKR RS485 під'єднати до аналогічного порту в СК подати живлення від оперативного джерела живлення, і далі клеми 3-9 під'єднати до керованих випрямлячів.

Вибір трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН) для системи 6 кВ потребує ретельного розгляду кількох ключових параметрів і характеристик, щоб забезпечити відповідність вимогам безпеки, надійності та точності вимірювань. Нижче наведено основні критерії, які слід враховувати при виборі:

Критерії вибору трансформаторів струму (ТС):

- Номінальний первинний струм: Визначається максимальним струмом у лінії. Наприклад, якщо максимальний струм у лінії становить 200 А, вибирається трансформатор із номінальним первинним струмом 200 А. Номінальний вторинний струм: Зазвичай становить 1 А або 5 А залежно від використовуваних вимірювальних приладів та реле.

- Клас точності: Визначається відповідно до вимог до точності вимірювань і захисту. Для вимірювань зазвичай використовуються класи точності 0.2, 0.5 або 1. Для захисту можуть використовуватися класи точності 5Р або 10Р.

- Коефіцієнт безпеки (FS): Показник, що визначає безпеку трансформатора при коротких замиканнях. Зазвичай використовуються трансформатори з FS від 5 до 10.

- Термічна та динамічна стійкість: Повинна відповідати умовам роботи в мережі 6 кВ, з урахуванням можливих аварійних режимів.

- Конструктивні особливості: Вибір між прохідними та не прохідними конструкціями залежить від способу монтажу і розміщення.

- Критерії вибору трансформаторів напруги (ТН): Номінальна первинна напруга: Має відповідати номінальній напрузі мережі, наприклад, 6 кВ. Номінальна вторинна напруга: Зазвичай становить 100 В або 110 В залежно від використовуваних вимірювальних приладів. Клас точності: Для вимірювань вибирають класи точності 0.2, 0.5 або 1. Для захисту можуть використовуватися класи точності 3Р або 6Р.

- Конструктивні особливості: Однофазні або трифазні трансформатори, залежно від схеми з'єднання в мережі.

- Ізоляційні властивості: Відповідність вимогам до ізоляції для роботи при напрузі 6 кВ, з урахуванням можливих перенапруг.

- Кліматичне виконання і ступінь захисту: Відповідність умовам навколошнього середовища (наприклад, IP54 для зовнішньої установки).

Згідно цих критерій було обрано ТН 6кВ/100В та ТС 200/5А

### **Висновок.**

Згідно розрахунків та вимог вибрали обладнання для силових елементів:

- Реактор РТСТ-6-159-2.5-5 У3;
- Система керування KB Exilogic TE4.

Для елементів керування:

- Аналізатор мережі DMKR;
- Трансформатор напруги ТН 6кВ/100В;
- Трансформатор струму ТС 200/5А.

## 6 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПУСКОМ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

### **6.1 Схема керування масляним вимикачем**

Пуск синхронного двигуна в роботу виконується високовольтним масляним вимикачем відповідно схеми поданої на рисунку 6.1. При замиканні ключа керування подається напруга на соленоїд включення KM(on). Силові контакти масляного вимикача включають напругу живлення статорних обмоток. Пуск двигуна супроводжується збільшенням статорного струму, який вимірюється системою керування (рис. 6.2), яка блокує подачу напруги збудження на роторну обмотку. В колі ротора наводиться змінна напруга з частотою ковзання, яка відкриває тиристори VS9 та VS8, і замикається на пусковий резистор R1.

При досягненні швидкості обертання двигуна значення близької до синхронної швидкості струм статора зменшується до значень дещо більших номінального, система керування включає збудження і двигун втягується в синхронізм.

Вимкнення двигуна в нормальніх режимах відбувається ключем шляхом подачі напруги на соленоїд вимкнення KM(off). При аварійному вимкненні спрацьовує один з трьох видів захисту: RL1 – максимальний струмовий захист; RL2 – захист від перевантажень; RL3 – захист від тривалого асинхронного ходу.

У разі виникнення аварійної ситуації нормально відкриті контакти цих реле замикаються і вмикають проміжне реле захисту R<sub>зах</sub>, контакти якого подають напругу на соленоїд вимкнення і масляний вимикач вимикається.

Після подачі напруги на соленоїд виключення розмикає силові контакти, допоміжні контакти сигналізують DMKR про це і останній формує сигнал керування для переходу керованого випрямляча в інверторний режим.

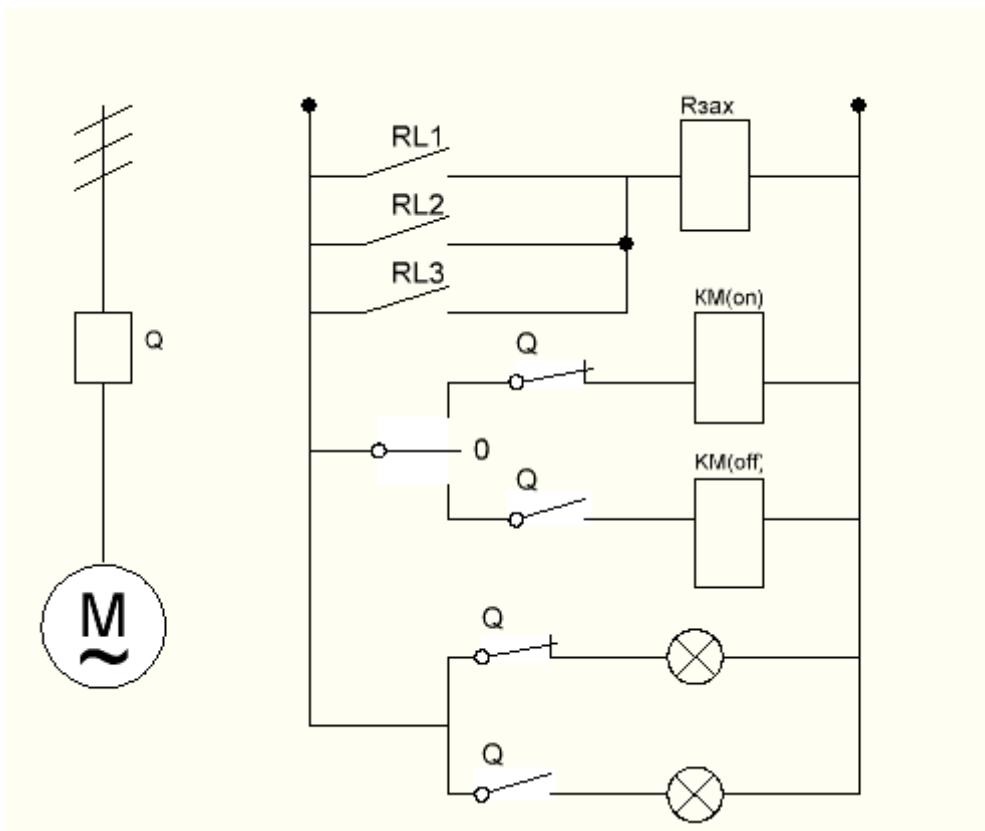


Рисунок 6.1 – Схема керування масляним вимикачем

## 6.2 Схема керування пуском та регулюванням збудженням СД

Для керування пуском та регулюванням збудження синхронного двигуна було розроблено схему подану на рис. 6.2. Система керування складається з аналізатора мережі DMKR, що здійснює контроль параметрів статорного кола та системи керування керованим випрямлячем Exilogic TE4.

Ці два пристрої зв'язані між собою за допомогою RS485, що забезпечує обмін даними між ними за відповідним протоколом.

На аналогові входи DMKR подано напругу з вторинних обмоток трансформатора напруги ТН, первинні обмотки якого включені на лінійну напругу статора, та струм вторинної обмотки трансформатора струму ТС увімкненого в статорне коло.

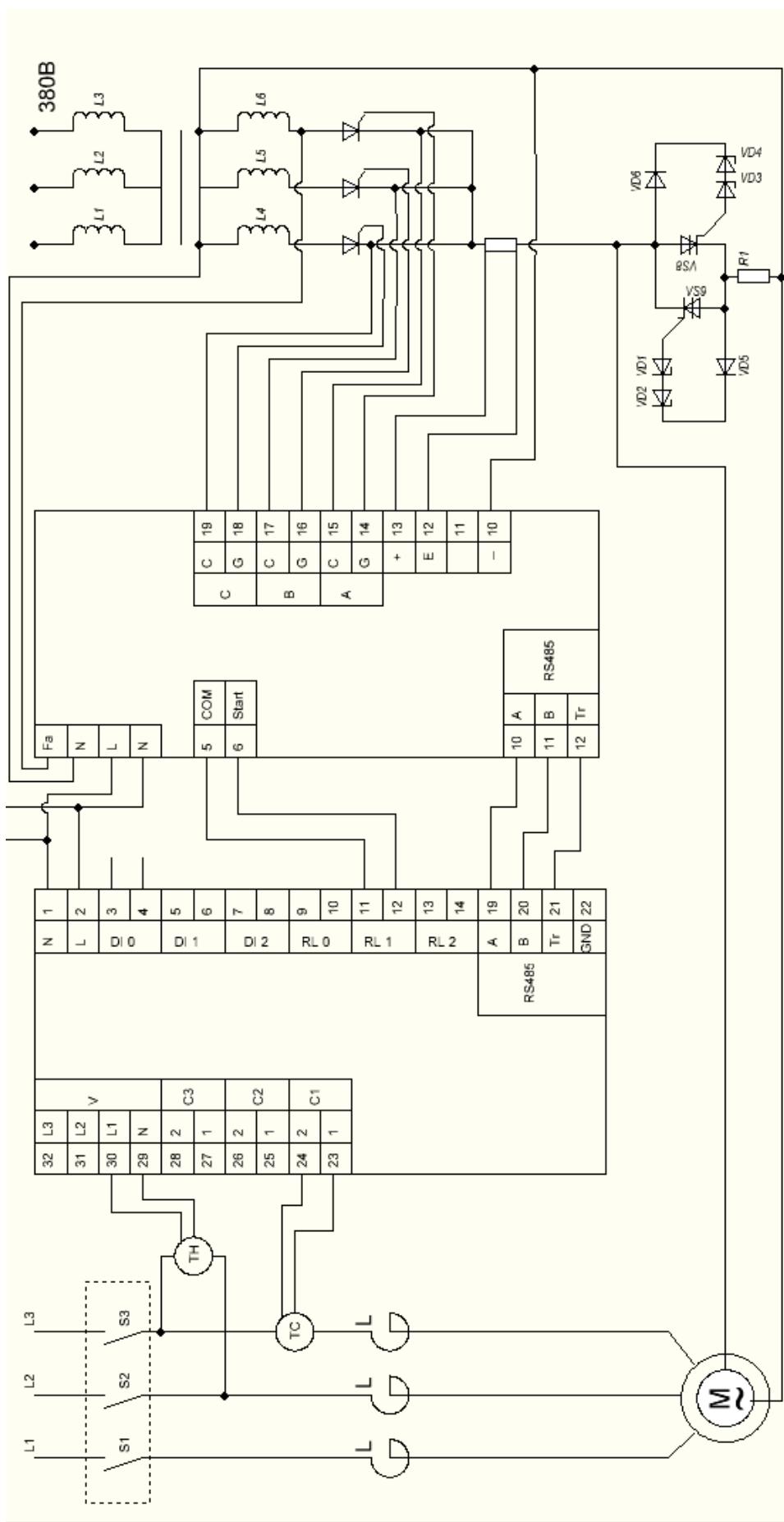


Рисунок 6.2 – Схема керування пуском та регулюванням збудженням СД

Подача збудження в роторне коло відбувається виключно після дозволу DMKR що реалізовано за допомогою зв'язку його релейного виходу та дискретного входу плати керування керованим випрямлячем. Цим досягається блокування подачі імпульсів на керуючі електроди тиристорів в пускових режимах.

Плата керування збудженням здійснює вимірювання напруги шунта, що включений в роторне коло, та працює як регулятор струму ротора. Також здійснюється вимірювання напруги збудження.

### 6.3 Регулювання збудженням в синхронних режимах

В синхронних режимах система керування збудженням працює за одним з двох режимів. Перший режим роботи системи з мінімальним струмом статора, що відповідає роботі з коефіцієнтом потужності рівним одиниці. Система автоматичного регулювання струму збудження працює зі зворотнім зв'язком за реактивною потужністю, що вимірюється DMKR, та передається платі керування за протоколом обміну даних. Це відповідає точці мінімального значення струму статора V-подібної характеристики рис. 6.3

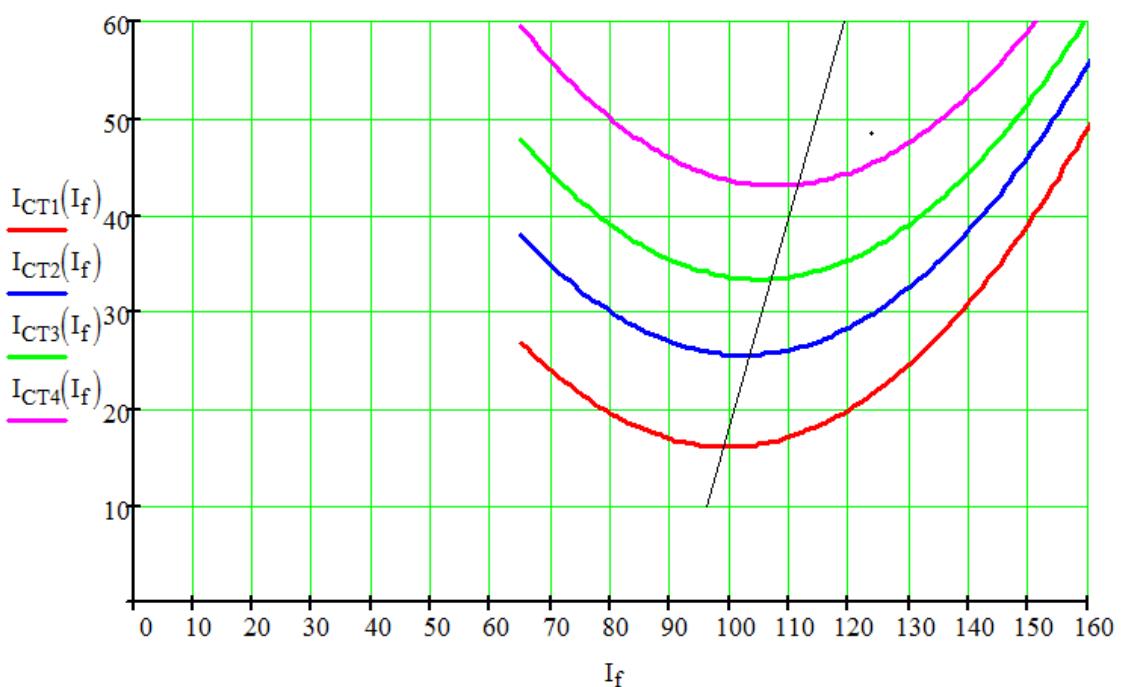


Рисунок 6.3 – Сімейство V-подібних характеристик

На рисунку 6.3 зображено сімейство V-подібних характеристик, що являють собою залежність струму статора від струму ротора за різних значень статичного моменту на валу двигуна. При роботі синхронного двигуна статичний момент на його валу може змінюватись, а відповідно буде змінюватися і точка мінімального струму статора. Система керування відпрацьовує ці зміни і забезпечує роботу з нульовою реактивною потужністю.

Інший режим полягає в можливості роботи синхронного двигуна у якості компенсатора реактивної потужності. При збільшенні струму статора синхронний двигун починає генерувати реактивну потужність, значення уставки регулювання реактивної потужності задається вручну в DMKR, або за допомогою мережевого зв'язку системою керування реактивною потужністю відділення, цеху чи усього підприємства. Цей режим ілюструє рисунок.6.4

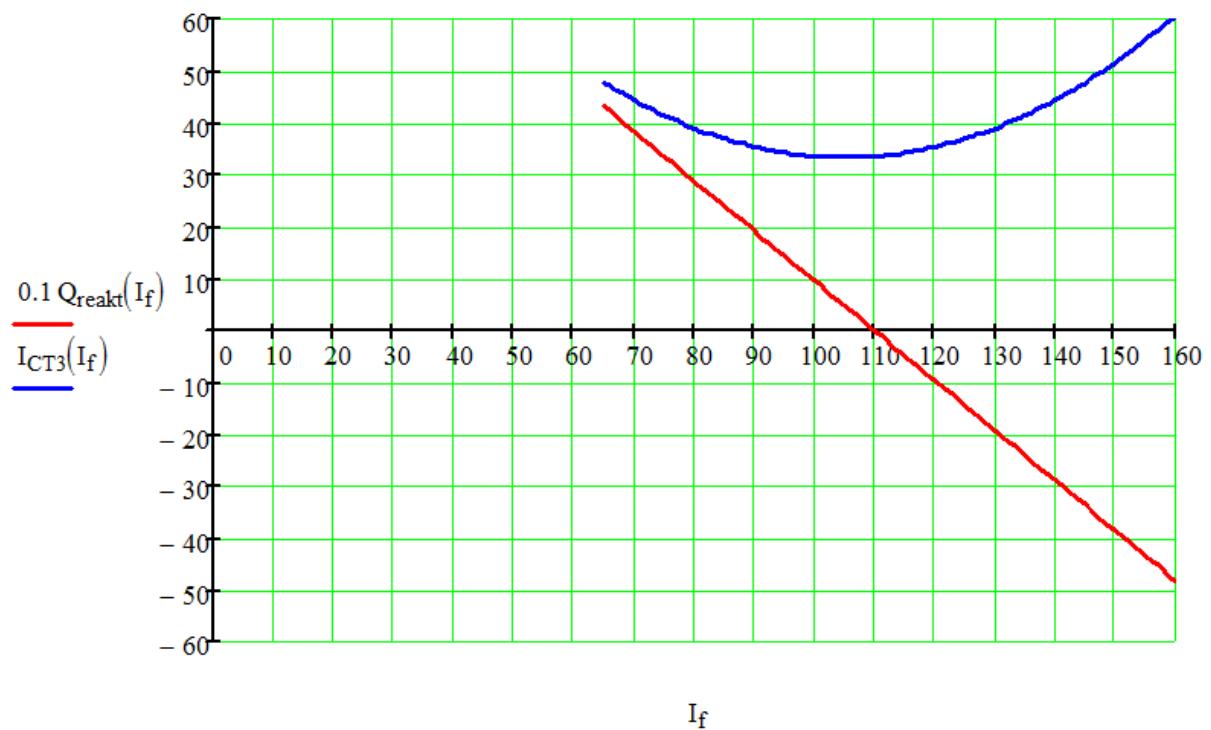


Рисунок 6.4 – регулювання реактивної потужності

На рисунку 6.4  $I_{ct3}$  – залежність струму статора за статичного моменту  $M_{\text{стат}} = 0.6 \cdot M_{\text{ном}}$ ,  $Q_{\text{реакт}}$  – споживаної двигуном реактивної потужності від струму збудження. При збільшенні струму ротора більше 110

А двигун переходить в режим компенсатора, про що свідчить від'ємне значення споживаної реактивної потужності. Найбільше можливе значення реактивної потужності обмежується номінальним значенням струму статора або номінальним значенням струму ротора.

Розрахуємо значення максимальної генерованої потужності для прикладу рис. 6.4

Отже, така система на основі двигуна номінальною потужністю 500 кВт з завантаженням 0.6  $M_{\text{ном}}$  здатна компенсувати 480 кВар . При чому регулювання здійснюється в автоматичному режимі.

**Висновок.** В даному розділі було описано схему керування масляним вимикачем та схему керування пуском та розписано алгоритм роботи схеми регулювання збудженням СД.

## 7 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розроблені заходи з охорони праці під час модернізації та експлуатації системи пуску та регулювання синхронного двигуна. На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який здійснює обслуговування синхронного двигуна, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

## 7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

### 7.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення силового обладнання, яке використовується на підприємстві, та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 x 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв’язку з наявністю у цехах струмопровідної підлоги.

Під час роботи, пов’язаної з доторканням до струмовідних частин електродвигуна або до частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигун і на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди» [3]. Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від’єднанням або без від’єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в РУ.

Під час роботи на електродвигуні напругою до 1000 В або механізмі, який приводиться ним у рух, зняття напруги і заземлення струмовідних жил кабелю слід виконувати згідно з [3].

Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів і вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з’єднаних з ними механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засувки і шибери цих механізмів, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів. Забороняється знімати огороження тих частин електродвигунів, що обертаються, під час їх роботи. Операції з вимикання і вмикання електродвигунів напругою понад 1000 В пусковою апаратурою з приводами ручного керування слід проводити з ізолювальної основи із застосуванням діелектричних рукавичок.

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III. В цьому разі необхідно

дотримуватися таких заходів безпеки:

- працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машини, що обертаються;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися руками одночасно до струмовідніх частин двох полюсів або струмовідніх і заземлених частин.

Кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів.

Під час роботи на електродвигуні заземлення може бути встановлене на будь-якій дільниці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаній з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єдання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

Якщо на відключенному електродвигуні роботи не провадять або їх перервано на кілька днів, то від'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена з боку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину з жилами кабелю, чи з'єднувати між собою жилы кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єдання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

На однотипових або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені. Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу — в

оперативному журналі цеху (дільниці), що провадить випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження. Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця.

Після випробування провадиться повторний допуск з оформленням у наряді. Під час виконання роботи за розпорядженням на повторний допуск розпорядження дається знову.

### **7.1.2 Електробезпека**

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [4, 5]:

- 1) Для запобігання електротравм від контакту з нормальнострумопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;
- 2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

#### **3) Електрозахисні засоби захисту**

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути

забезпечений випробуваннями засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електrozахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електrozахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

## **7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

### **7.2.1 Мікроклімат**

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [6] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 7.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт ІІа.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості ІІа	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]: температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C; якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м; для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та приплівна вентиляційні системи.

### 7.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup> [6]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 7.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [7]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша

зернистість), тим вище небезпека. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання. Планувати прибирання потрібно на час, коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

### 7.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт в процесі виконання робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 7.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалент-ний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характе-ристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загаль-ного		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

## 7.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки». Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньогеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукоглиняючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

## 7.2.5 Виробнича вібрація

На нашому підприємстві присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 7.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октаvnі смуги з середньогеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$						

\*В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації,  $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$ , в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування ЗІЗ, а саме рукавиці, вкладиші та прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

### 7.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо - вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Приміщення, де здійснюються експлуатація синхронного електродвигуна, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколошнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця за межами приміщень, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості.

До ІІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несу чими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)							
	стіни				коло-ни	сходові площа-ди, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвальми	елементи суміщеніх покріттів
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 5.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських

будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (зnamенник).

Таблиця 7.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території підприємства встановлено 35 порошкових вогнегасників ВП-5(8).

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської дипломної роботи було проведено аналіз об'єкта модернізації, а саме: проаналізовано будову і принцип дії синхронних двигунів, синхронні та асинхронні режими роботи та існуючі способи пуску СД.

Визначено основні технічні характеристики синхронного двигуна, його призначення та паспортні данні зведені в таблиці.

Розглянуті 2 методи системи керування СД, а саме метод встановлення тиристорного пристрою плавного пуску (ТРН) та метод модернізації шафи керування пуском і системи збудження. До цих методів було виконано економічні розрахунки та порівняні між собою.

Проаналізовано методи та засоби обмеження пускових режимів. Побудовано узагальнену структурну схему керування пуском та регулювання збудженням СД. Виконано попередні розрахунки силових кіл та побудовано механічні характеристики СД в асинхронних режимах.

Здійснено вибір обладнання силових кіл статора та ротора, і елементів системи керування

Розроблено схему керування пуском та регулювання збудженням СД та схему керування масляним вимикачем.

Проведена робота над розділом охорона праці

В роботі використовувалися математичні ППП «Matlab» та «Matcad». Графічні матеріали виконувалися в «Splan».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електромеханічне обладнання та автоматизація насосної станції подачі води. НТУ КПІ, 2019 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28167/1/Ezgor\\_bakalavr.docx](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28167/1/Ezgor_bakalavr.docx).
2. Видмиш А.А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проєктування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник / А. А. Видмиш, С. М. Бабій, В. В. Петрусь. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 96 с.
3. Експериментальні дослідження електричних машин частина V синхронні машини/ Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Грабенко І.В. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 137 с.
4. Васильєв В. І., Ковалев С. А. "Електричні машини: Теорія та практика". - Київ: Техніка, 2018. - 480 с.
5. Гончаренко О. М. "Сучасні методи керування електричними машинами". - Харків: Основа, 2016. - 350 с.
6. Пархоменко О. В. "Теорія та практика регулювання синхронних машин". - Одеса: Наука і Техніка, 2020. - 420 с.
7. Коноваленко В. П. "Електронні системи керування електродвигунами". - Львів: Світ, 2015. - 320 с.
8. Іванов О. С. "Модернізація систем керування синхронними двигунами на основі тиристорних регуляторів". Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2021, № 3, с. 45-52.
9. Семенов М. В. "Ефективність застосування тиристорних регуляторів у системах керування синхронними двигунами". Електротехніка і електромеханіка, 2019, № 6, с. 22-30.
10. Павленко О. В. "Вплив тиристорних регуляторів на стабільність роботи синхронних машин". Вісник Харківського національного технічного університету, 2020, № 4, с. 31-39.
11. Соколов В. А. "Основи електроприводу та автоматики: Навчальний посібник". - Київ: Видавництво Київського національного університету,

2017.- 290 с.

12. Нікітін С. П. "Електричні машини та їх керування: Навчальний посібник". - Дніпро: Дніпровський державний університет, 2018. - 310 с.
13. ДСНiП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
14. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
15. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=48644](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644).
16. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
17. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
18. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
19. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
20. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)
21. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
22. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та

локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

23. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

24. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

25. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

26. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_36/5-1-0-1759](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).

27. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: [http://www.poliplast.ua/doc/dbn\\_v.1.1-7-2002.pdf](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf).

28. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

## Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав.кафедри КЕМСК  
к.т.н., доц.  
  
Микола МОШНОРІЗ  
“02” 04 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
на бакалаврську дипломну роботу  
**МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПУСКОМ ТА  
РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА**

08-24.БДР.026.00.000 Т3

Керівник роботи  
  
к.т.н., ст. викл.  
Андрій КОВАЛЬ  
«02» 04 2024 р.

Виконав: ст. гр. ЕМ-22мс  
  
Максим МАШУКОВ  
«02» 04 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

## **1 Загальні відомості**

Повне найменування роботи «Модернізація системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна».

Скорочене найменування розробки – «Модернізація системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна».

Замовник – Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських дипломних робіт.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Синхронний двигун в сучасному світі являється невід'ємною частиною масштабних підприємств через його компактні розміри та потужність у порівнянні з асинхронними двигунами. При регулюванні  $\cos\varphi$  двигун виробляє реактивну складову, яка є необхідною для всієї системи електроприводів на підприємстві.

## **4 Вимоги до розробки**

Електропривод установки повинен забезпечувати стабільну роботу всіх механізмів в залежності від режиму його роботи. Експлуатація здійснюється в умовах запиленості та підвищеної температури.

## 5 Технічні характеристики

	Значення	ОВ
Позначення типу двигуна	СД2- 85/57- 10УХЛ4	
Номінальна потужність	300	кВт
Номінальна частота обертання	600	об/хв
Номінальний струм статора	57	А
ККД	94	%
Максимальний момент	1.7	-
Номінальний момент	1.7	-
Кпуск	1.1	-
Кном	1.1	-
Пусковий струм	5.2	А
Номінальний струм	5.2	А
Напруга збудження	43	В
Струм	161	А
Маса	2923	Кг

## 6 Комплектація розробки

Модернізована система керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна складається з: Реактору - РТСТ-6-159-2.5-5 УЗ; Системи керування КВ Exilogic TE4; Аналізатора мережі DMKR; Системи керування КВ ABB DCS550; Трансформатора напруги ТН 6кВ/100В; Трансформатора струму ТС 200/5А; Двигуна - СД2-85/57-10УХЛ4.

## **7 Джерела розробки**

1. Видмиш А.А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник / А. А. Видмиш, С. М. Бабій, В. В. Петрусь. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 96 с.
2. Експериментальні дослідження електричних машин частина V синхронні машини/ Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Грабенко І.В. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 137 с.
3. Васильєв В. І., Ковалев С. А. "Електричні машини: Теорія та практика". - Київ: Техніка, 2018. - 480 с.
4. Гончаренко О. М. "Сучасні методи керування електричними машинами". - Харків: Основа, 2016. - 350 с.

## **8 Етапи виконання**

Основна частина	
Графічна частина	

## **9 Конструктивне виконання**

Система керування та регулювання збудження синхронного двигуна виготовляється окремими блоками, які реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

## **10 Технічне обслуговування та ремонт**

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

## **11 Показники технологічності**

Система керування та регулювання збудження синхронного двигуна виконуються на сучасній елементній базі, його монтаж, повинен відповідати правилам влаштування електроустановок.

## **12 Живлення електропривода**

Живлення електроприводу має бути 6 кВ змінного струму, а живлення ротору під час пуску відбувається постійним струмом 220В.

## **13 Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

**Додаток Б  
(обов'язковий)**

**ГРАФІЧНА ЧАСТИНА**

**МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПУСКУ ТА КЕРУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ**  
**СИНХРОННОГО ДВИГУНА**



Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп’ютеризованих електромеханічних систем і  
комплексів

Бакалаврська дипломна робота на тему:  
**МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПУСКУ ТА КЕРУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ  
СИНХРОННОГО ДВИГУНА**

Виконав ст. групи ЕМ-22МС  
Максим МАШУКОВ  
Керівник БДР к.т.н. ст. викл.  
Андрій КОВАЛЬ

# Обґрунтування роботи

Синхронний двигун в сучасному світі являється невід'ємною частиною масштабних підприємств через його компактні розміри та потужність у порівнянні з асинхронними двигунами. При регулюванні  $\cos\varphi$  двигун виробляє реактивну складову, яка є необхідною для всієї системи електроприводів на підприємстві. Ця робота необхідна для того щоб регулювати вироблення реактивної потужності, та для покращення пускових моментів синхронного двигуна



**Метою** є підвищення надійності та ефективності роботи синхронного електроприводу шляхом модернізації системи керування пуском і регулюванням збудження синхронного двигуна

Для досягнення мети необхідно:

Проаналізувати об'єкт модернізації та існуючі способи пуску і регулювання синхронного двигуна;

Визначити основні технічні характеристики СД;

Провести техніко-економічне обґрунтування вибору автоматизованої системи пуску та регулювання струму збудження;

Розробити методи та засоби обмеження пускових режимів синхронних двигунів, а також регулювання струму збудження з можливістю побудови його автоматичного регулятора ;

Здійснити вибір основного обладнання для силових кіл статора та ротора, а також елементів системи керування;

Розробити схеми модернізованої системи керування пуском та регулювання збудження СД;

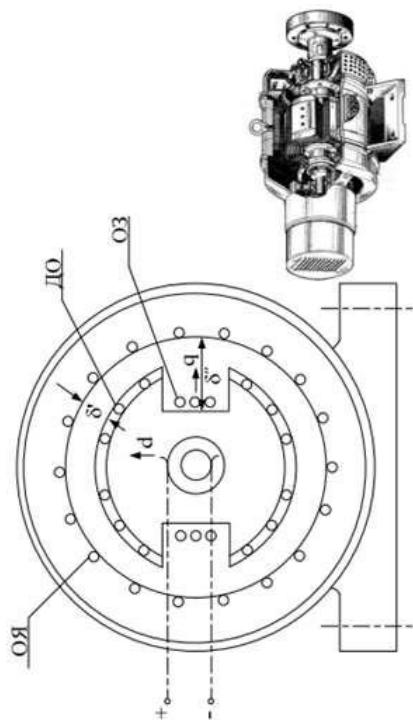
Розглянути питання охорони праці на виробництві з даним двигуном.

**Об'єктом** дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси, які протикають в синхронному двигуні в асинхронних та синхронних режимах роботи.

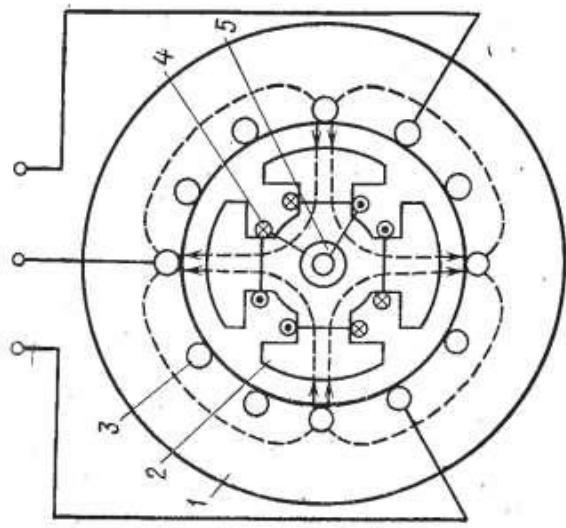
**Предметом** дослідження є система керування пуском та регулюванням збудженням, яка включає в себе апаратне забезпечення, алгоритми та програмне забезпечення для реалізації ефективного управління роботою синхронного двигуна.

## Основні технічні параметри двигуна СД2-85/57-10УХЛ4

	Значення	Одиниці вимірювання
Позначення типу двигуна	СД2-85/57-10УХЛ4	
Номінальна потужність обертання	300	кВт
Номінальний струм статора	600	аб/хв
ККД	94	%
М <sub>макс</sub>	1.7	-
М <sub>ном</sub>	1.7	-
Кпуск	1.1	-
К <sub>ном</sub>	1.1	-
I <sub>пуск</sub>	5.2	А
I <sub>ном</sub>	5.2	А
Напруга збудження	43	В
Струм	161	А
Маса	2923	Кг



Поперечний переріз явнополюсного СД

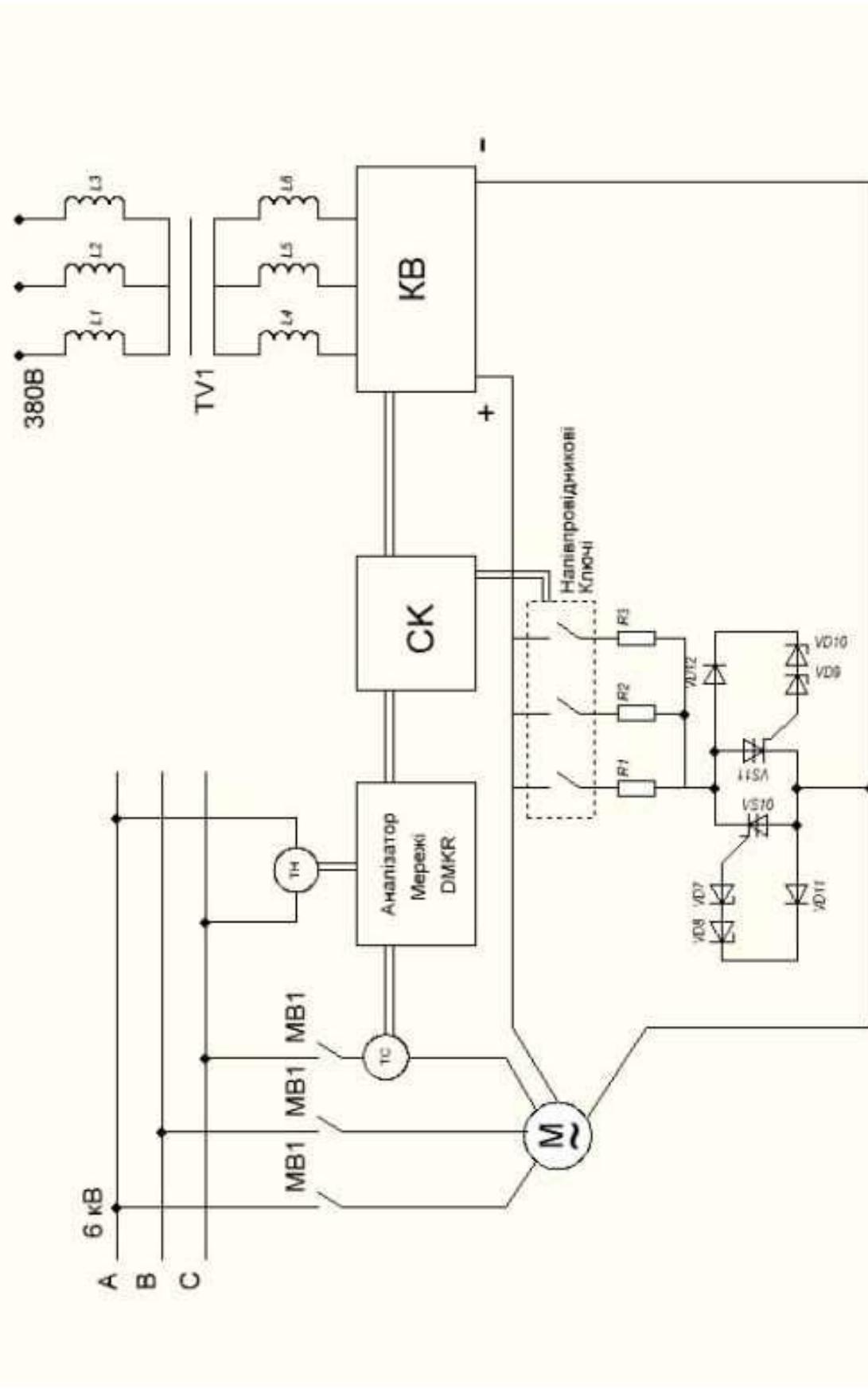


Електромагнітна схема чотирьохполюсної синхронної машини

## Економічний аналіз

	Модернізація шкафи	ТРНІ
Вартість струмообмежуючого реактора, грн.	396000	
Вартість сист. керув./тирист. перетв., грн.	150000	2500000
Вартість робіт	150000	48890
Капітальні затрати, грн.	696000	2548890
Річні кап. затрати, грн./рік	118320	4333311
ККД системи, %	0.97	0.97
Затрати на електроен. грн./рік	22577320	22577320
Затрати на аморт., грн./рік	69600	254889
Затрати на ремонт, грн./рік	13920	50998
Затрати на обслугов., грн./рік	1133042	1144160
Приведені річні затрати, грн./рік	23912202	28360678

## Узагальнена структурна схема пуску та регулювання збудження СД



## Розрахунок максимального та пускового моментів

$$M(s) = M_{\max} \frac{Z+q}{S_k + \frac{S_k+q}{s}}$$

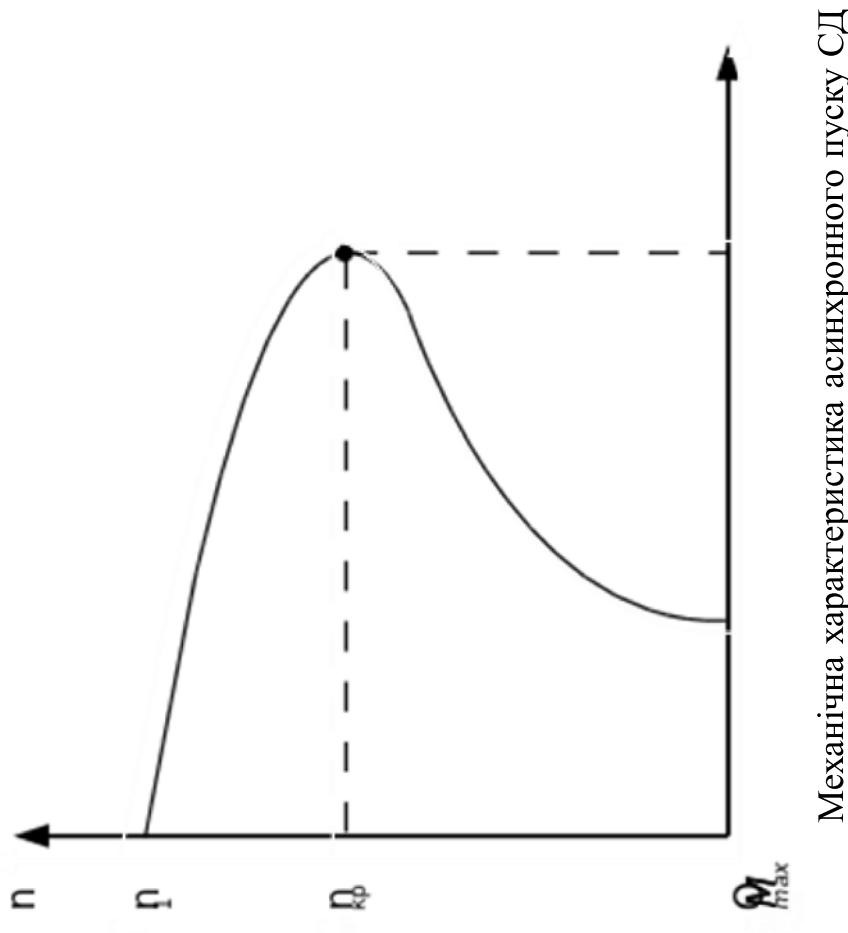
$$M_{\max} = \frac{U_0^2}{2\omega_0} * \frac{R_2}{Z_1}$$

$$S_k = \frac{R_2}{Z_1}$$

Для того щоб визначити пусковий момент:

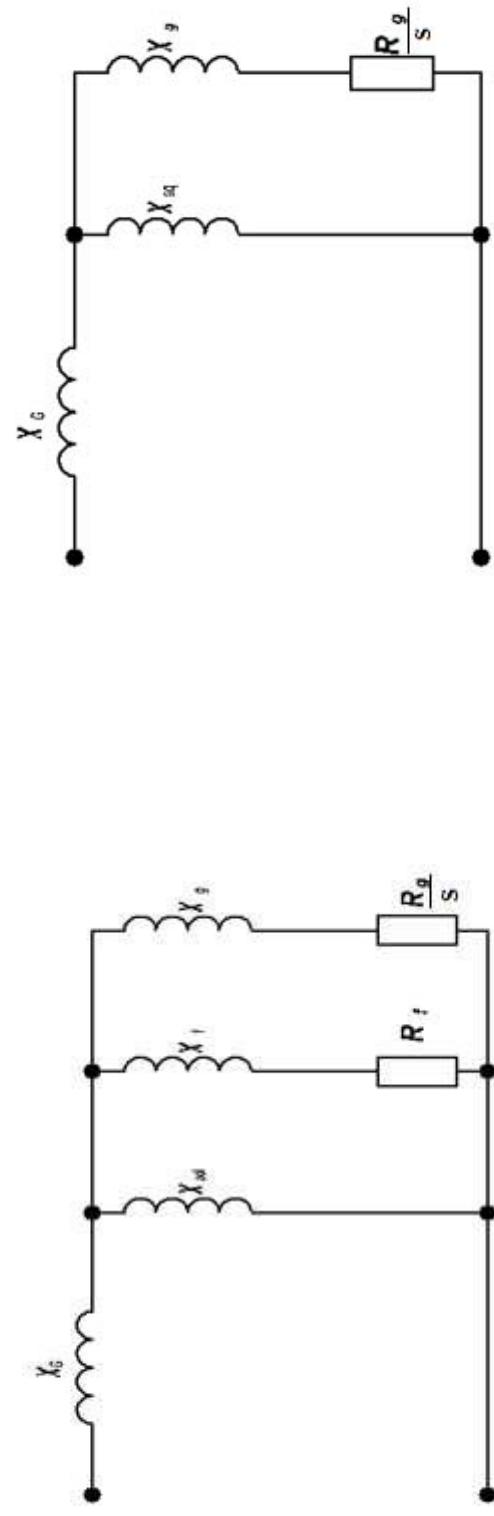
$$n = 0 \Rightarrow S = 1$$

$$M_{\text{пуск}} = M(S=1) = M_{\max} \frac{1}{S_k + S_k + q}$$



Механічна характеристика асинхронного пуску СД

## Схеми заміщення



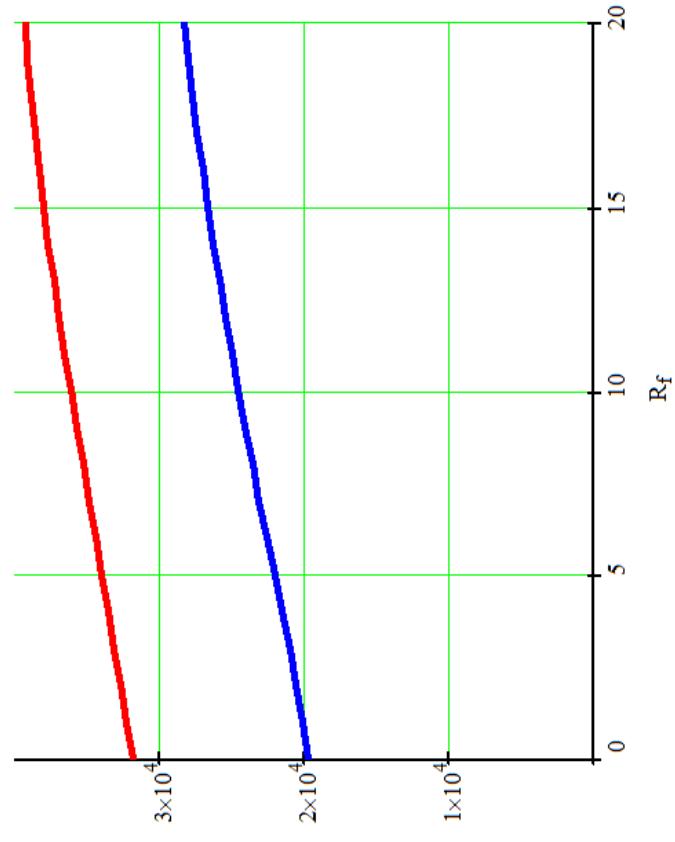
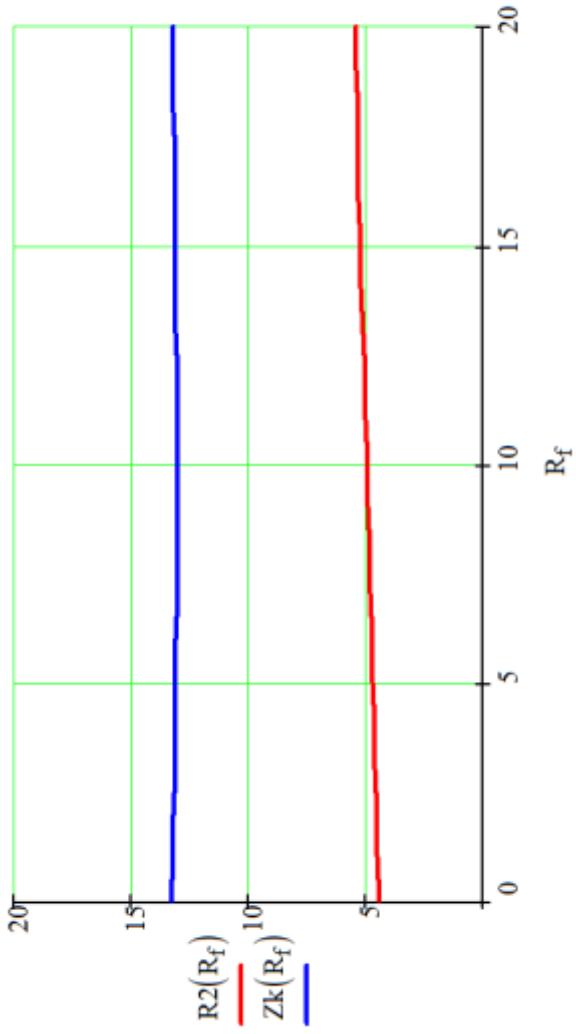
$$\underline{Z}_{ds} = R_1 + X_G + \frac{1}{\frac{1}{jX_{ad}} + \frac{1}{R_f + jX_f} + \frac{1}{R_g + jX_g}}$$

$$\underline{Z}_{qs} = R_1 + jX_G + \frac{1}{\frac{1}{jX_{aq}} + \frac{1}{R_g + jX_g}}$$

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{Z}{\frac{1}{Z_{ds}} + \frac{1}{Z_{qs}}} = R_2 + jX$$

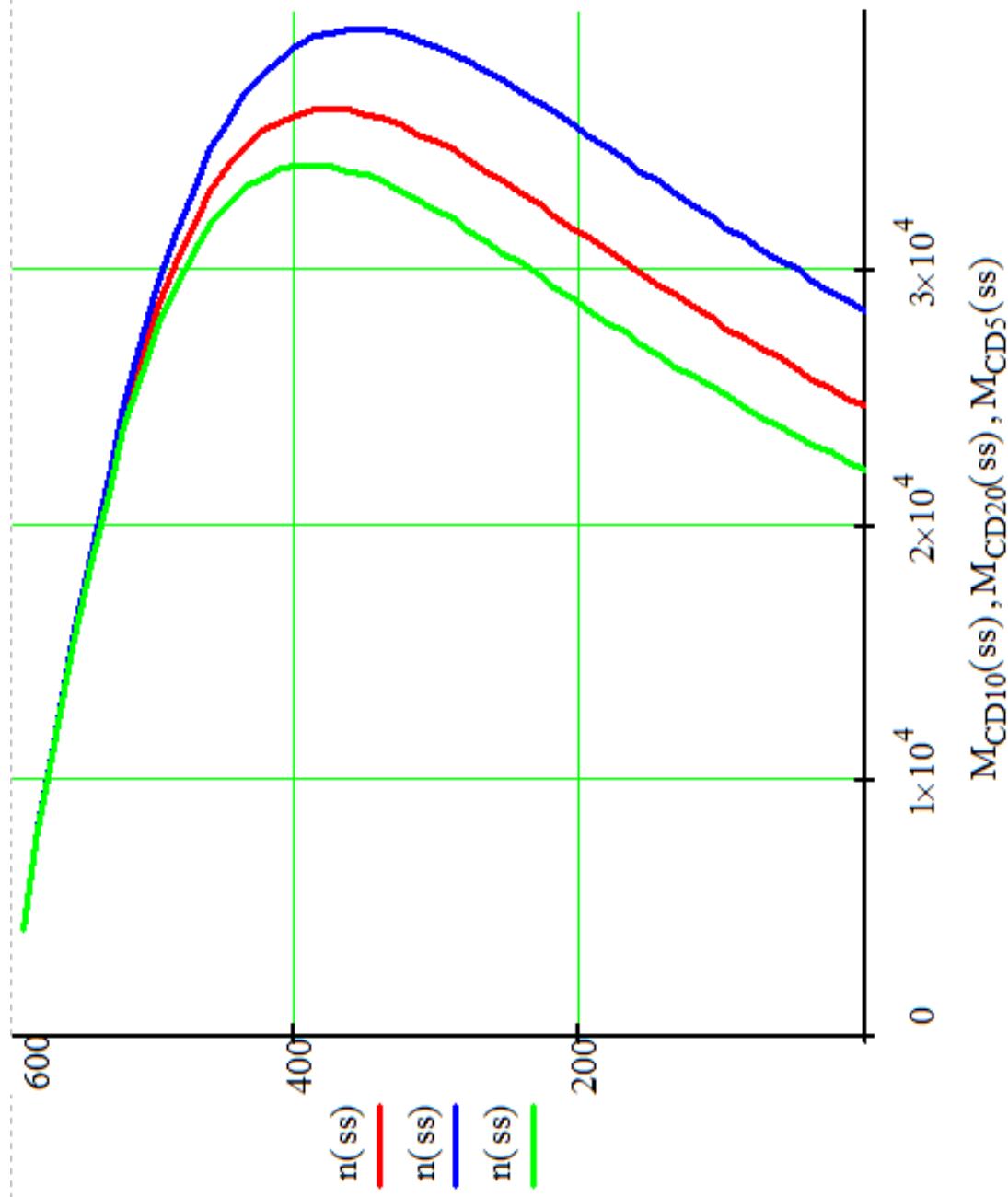
$Z_1$  – опір прямої послідовності схеми заміщення

**Залежність опорів схеми  
заміщення від значення  
додаткового опору**



**Залежності пускового і  
максимального моментів  
від значення додаткового  
опору**

## Механічна характеристика при різних значеннях додаткового опору



## Попередній розрахунок реактора

$$Z_k = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} * I_{\text{пуск}}} = 11.687 \Omega$$

$$R_k = Z_k * \cos \varphi_k = 11.687 * 0 = 0 \Omega$$

$$X_k = Z_k * \sin \varphi_k = 11.687 * 1 = 11.687 \Omega$$

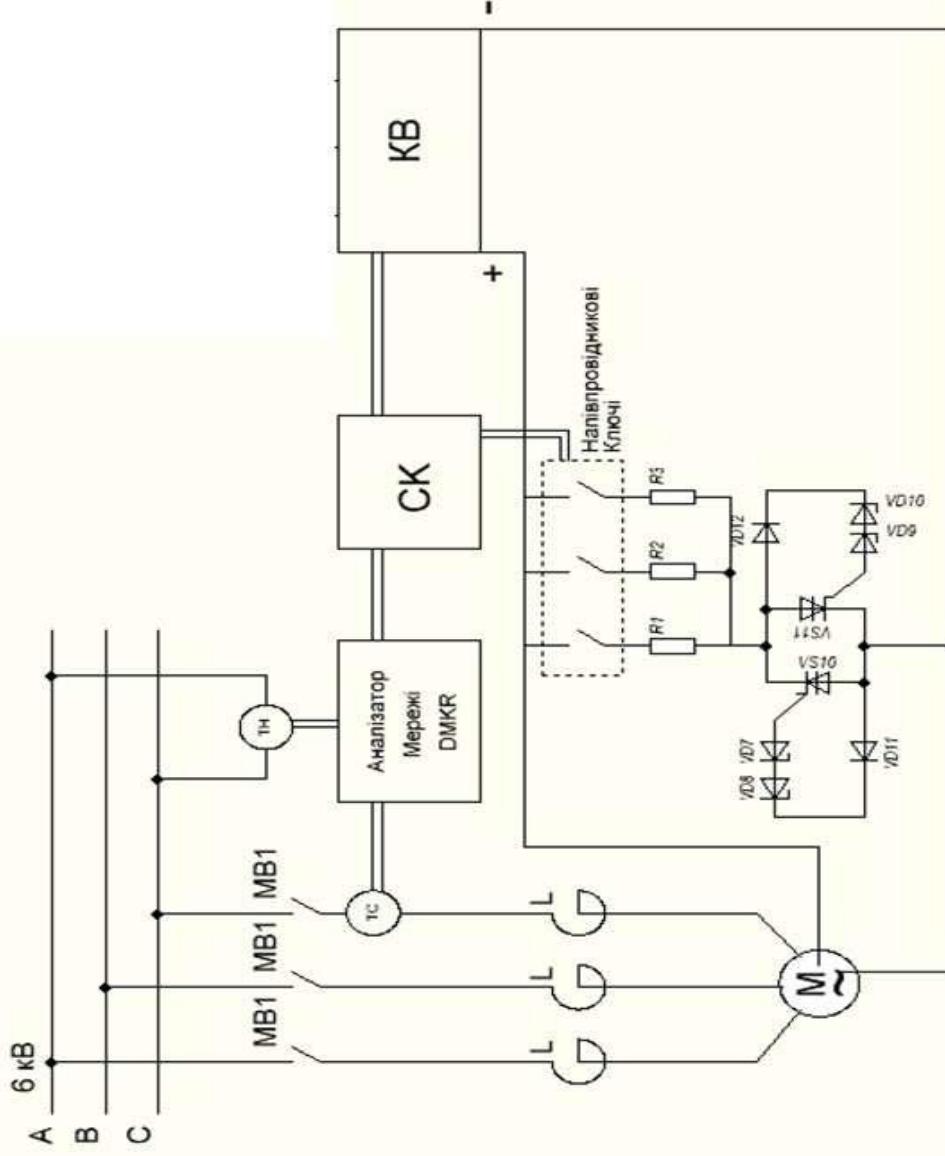
$$M = \frac{M_{\text{пуск, пакт}}}{M_{\text{пуск, пр.}}} = \frac{1}{2}$$

$$a = \frac{I_{\text{пуск, пакт}}}{I_{\text{пуск, пр.}}}$$

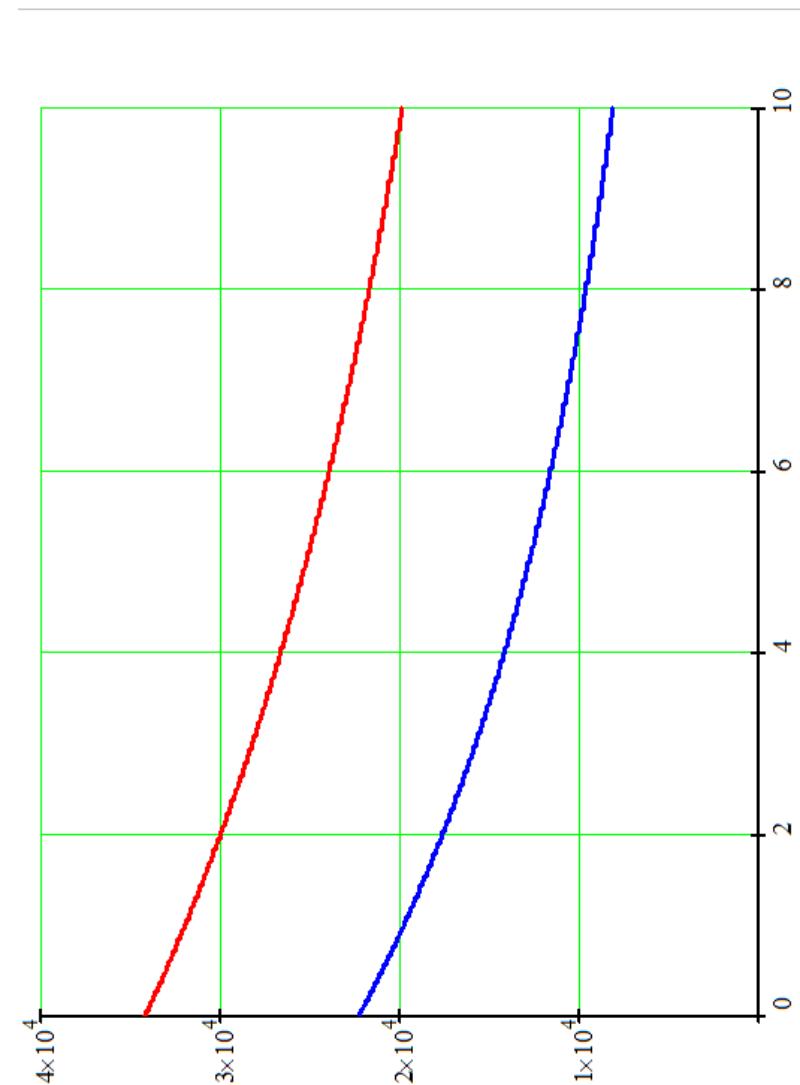
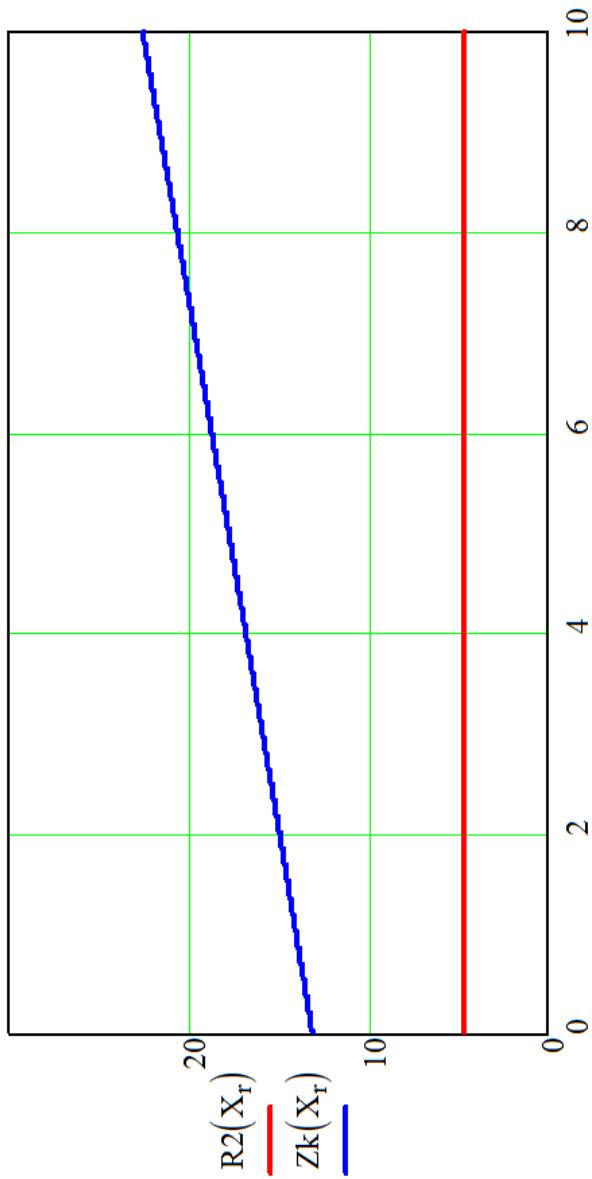
$$a = \sqrt{\bar{\mu}} = \sqrt{0.5} = 0.707$$

$$X_{\text{пакт}} = \sqrt{\frac{Z_k^2}{r} - R_k^2} - X_k = 4.841 \Omega$$

$$\Delta U_{\text{пакт}} = I_c * X = 57 * 5 = 285 \text{ kB}$$

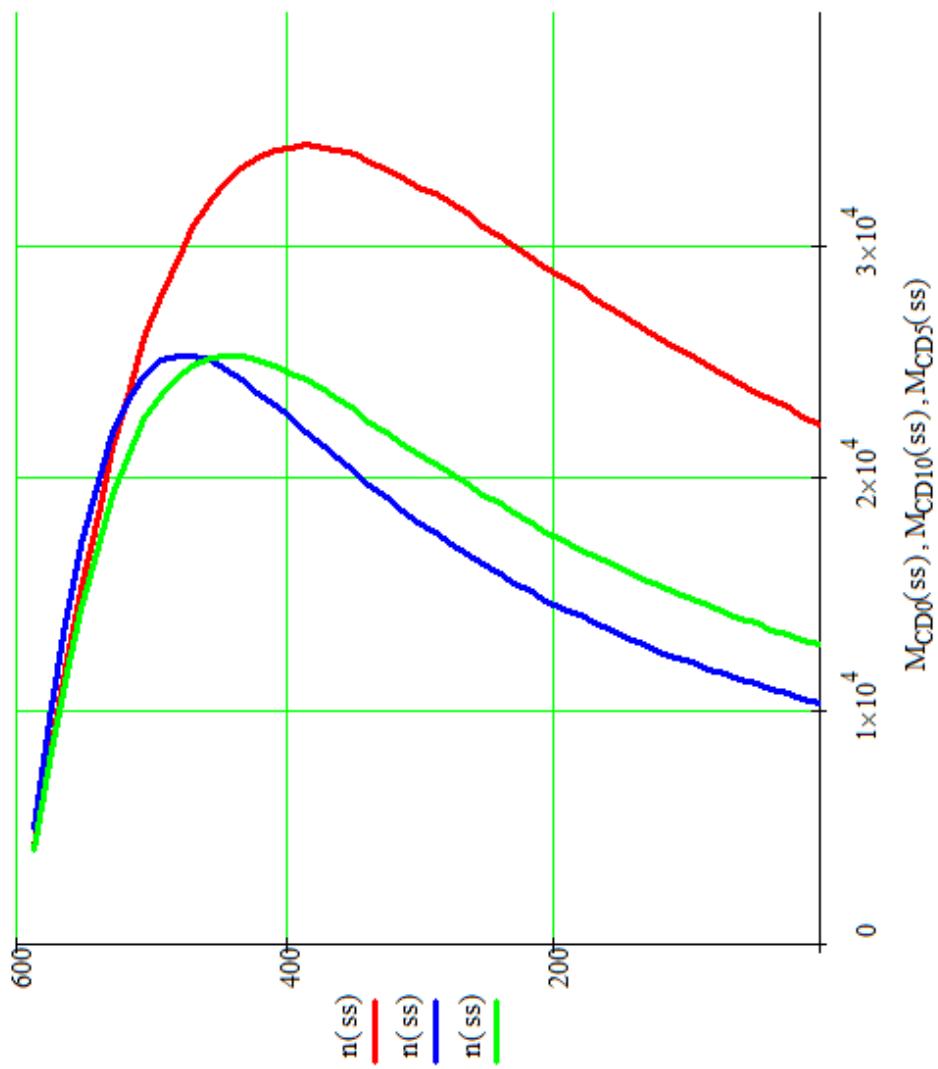


Залежність опорів схеми  
заміщення від значення  
реактивного опору



Залежності пускового і  
максимального моментів  
від значення  
реактивного опору

## Механічна характеристика з реакторами при різних значеннях реактивного опору

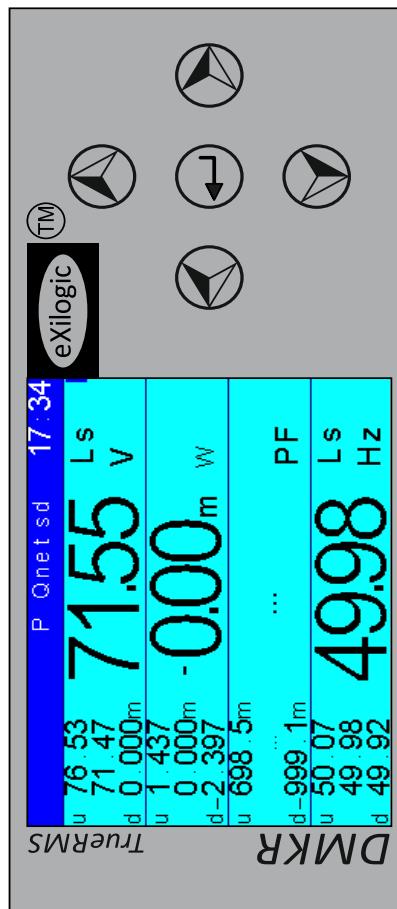


## Вибір основного обладнання

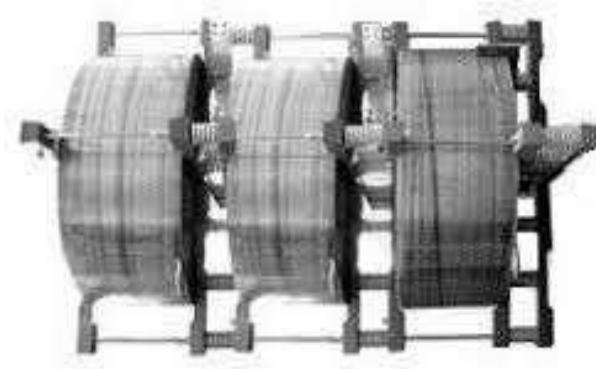
- Реактор РТСТ-6-159-2.5-5 У3;
  - Плата керування КВ Exilogic TE4
- Для елементів керування:
- Аналізатор мережі DMKR;
  - Система керування КВ Exilogic TE4;
  - Трансформатор напруги ТН 6кВ/100В;
  - Трансформатор струму ТС 200/5А.



Система керування КВ Exilogic TE4

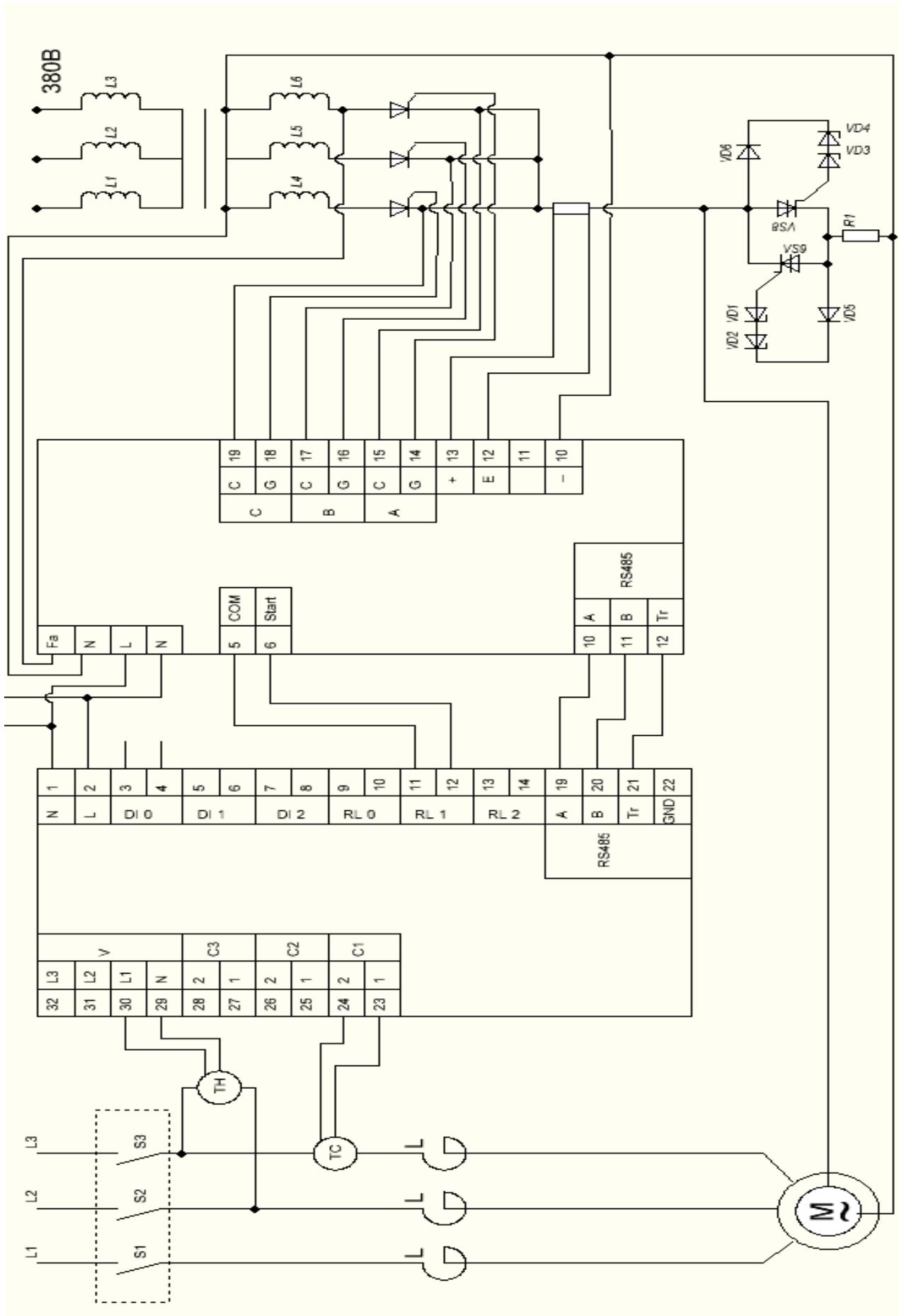


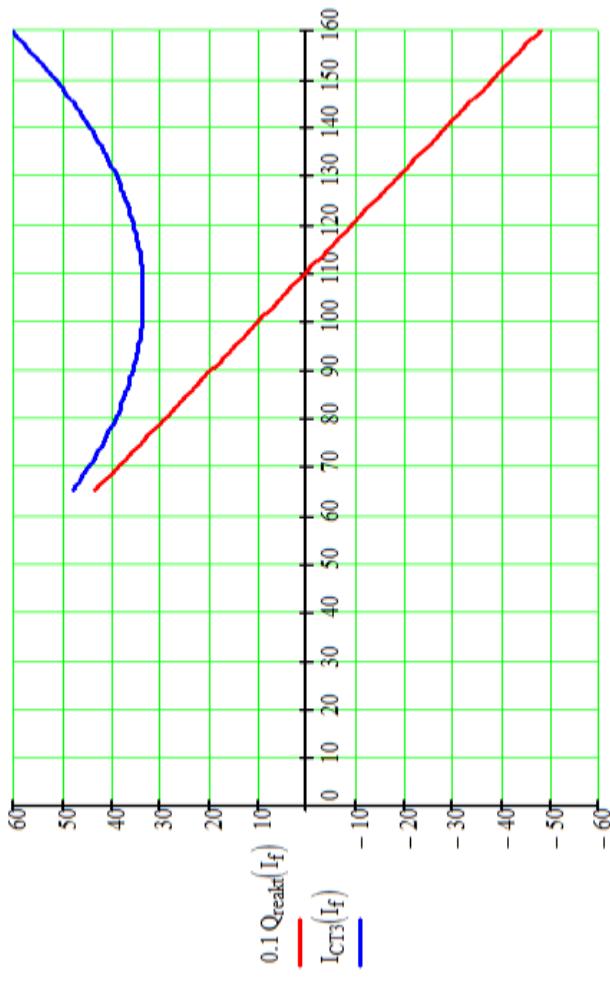
Екран аналізатору мережі DMKR



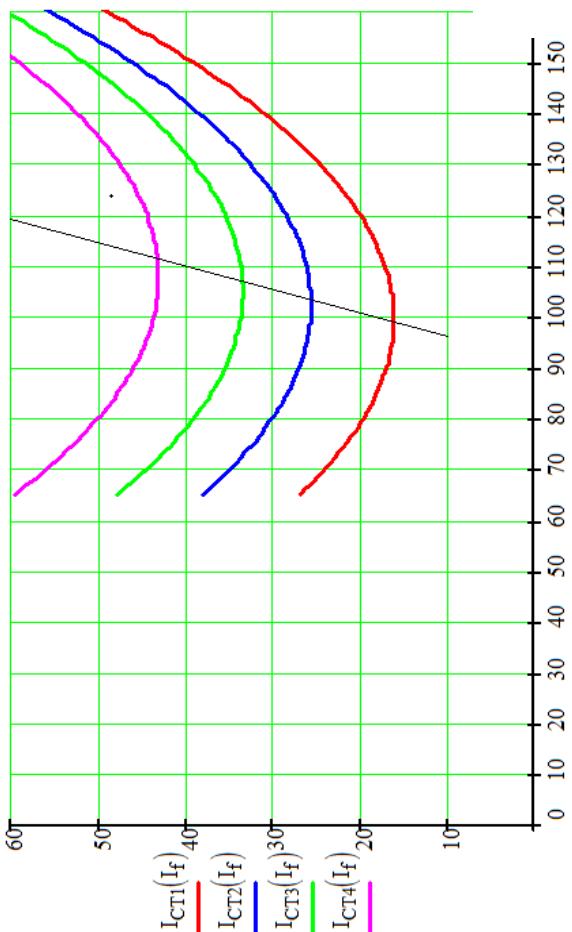
Реактор РТСТ-6-159-2.5-5 У3

# Схема керування пуском та регулюванням збудженням СД





$I_f$   
Регулювання реактивної потужності



Сімейство V-подібних характеристик

### Розрахунок генерації реактивної потужності

$$P_3 = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{CT3min}} = 34.71 \text{ кВт}$$

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{CT3nom}} = 59.24 \text{ кВт}$$

$$Q = \sqrt{S_n^2 - P_3^2} = 2056 \text{ кВт}$$

## **Висновки**

В результаті виконання бакалаврської дипломної роботи було проведено аналіз об'єкта модернізації, а саме: проаналізовано будову і принцип дії синхронних двигунів, синхронні та асинхронні режими роботи та існуючі способи пуску СД.

Визначено основні технічні характеристики синхронного двигуна, його призначення та паспортні данні зведені в таблиці.

Розглянуті 2 методи системи керування СД, а саме метод встановлення тиристорного пристрію плавного пуску (ТРН) та метод модернізації шафи керування пуском і системи збудження. До цих методів було виконано економічні розрахунки та порівняні між собою.

Проаналізовано методи та засоби обмеження пускових режимів. Побудовано узагальнену структурну схему керування пуском та регулювання збудженням СД. Виконано попередні розрахунки силових кіл та побудовано механічні характеристики СД в асинхронних режимах.

Здійснено вибір обладнання силових кіл статора та ротора, і елементів системи керування

Розроблено схему керування пуском та регулювання збудженням СД та схему керування масляним вимикачем.

Проведена робота над розділом охорона праці

В роботі використовувалися математичні ППП «Matlab» та «Matcad». Графічні матеріали виконувалися в «Splan».

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: «Модернізація системи керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна»

Тип роботи: бакалаврська дипломна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕМ, гр. ЕМ-22мс

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Коваль А.М.

(прізвище, ініціали, посада)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність	87,5 %
Схожість	12,5 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в  ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

*(підпис)*

*Паянок О.А.*

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

*М.Ю.Паянок*

*(підпис)*

*Машуков М.Ю.*

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

*А.М.Коваль*

*(підпис)*

*Коваль А.М.*

(прізвище, ініціали)

a Машуков

Аркушів

р. ЕМ-22мс

Наз  
збу  
Тип  
Під

Най

E

ПЛ

на  
са

ПЛ  
на

СИС

					08-24.БДР.026.00.000		
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата			
Розробив:		Машуков М.Ю.	<i>Машуков</i>	28.05	Модернізація системи керування пуском та регулювання збудженням синхронного двигуна	Літ.	Маса
Перевірив:		Коваль А.М.	<i>Коваль</i>	28.05			Мас
Т. контр.							
Рецензент		<i>Войтюк Ю.П.</i>		10.06		Аркуш	Аркушів
Норм. кон.		<i>Горюх О.А.</i>		28.05		ВНТУ, гр. ЕМ-22мс	
Затверд.		Мошноріз М.М.		28.05			