

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КАР'ЄРУ
ЗАВОДУ СИЛІКАТНОЇ ЦЕГЛИ»**

Виконав: студент VI курсу
групи Ен – 62 спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка».
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Щербатюк Р. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник: Гречин Д. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент: _____.
(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Левонюк В. Р.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ ____ ” _____ 202__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Щербатюку Руслану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз роботи системи електропостачання кар'єру заводу си-
лікатної цегли»

керівник роботи к.т.н., доцент Гречин Д. П.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 140 / к - с від 28.02.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розро-
бити)

Вступ

1. Компенсація реактивної потужності

2. Електропостачання підприємства

3. Аналіз роботи схеми електропостачання

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Техніко-економічна оцінка

Висновки

Перелік джерел посилання

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

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	<i>Дробот І. М., старший викладач</i>			
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз питання синхронна машина як пристрій компенсації реактивної потужності</i>	<i>28.02.2025 – 1.05.2025</i>	
2	<i>Розрахунок електропостачання кар'єру</i>	<i>2.05.2025 – 1.08.2025</i>	
3	<i>Аналіз роботи системи електропостачання кар'єру</i>	<i>2.08.2025 – 1.10.2025</i>	
4	<i>Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях</i>	<i>2.10.2025 – 1.11.2025</i>	
5	<i>Ефективність прийнятих рішень</i>	<i>2.11.2025 – 1.12.2025</i>	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	<i>2.12.2025 – 6.12.2025</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>7.12.2025 – 11.12.2025</i>	

Студент Щербатюк Р. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)Керівник роботи Гречин Д. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Р Е Ф Е Р А Т

Щербатюк Р. І. «Аналіз роботи системи електропостачання кар'єру заводу силікатної цегли». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 53 с. текстової частини, 14 таблиць, 22 рисунків, 25 джерел посилання.

У кваліфікаційній роботі: розглянуто синхронну машину як пристрій компенсації реактивної потужності; розраховано та вибрано елементи системи електропостачання кар'єру; побудовано модель мережі електропостачання кар'єру та проведено порівняльне дослідження її роботи із асинхронним та синхронним електродвигуном в математичному середовищі MATLAB/Simulink; розкрито питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях та проведено наближений економічний розрахунок.

Ключові слова: синхронна машина, компенсація реактивної потужності, збудження синхронної машини, землеснаряд, кар'єр, електропостачання, мережа електропостачання, трансформаторна підстанція, проводи живлення, мережа, модель, графічна залежність, коефіцієнт потужності, експериментальні дані, термін окупності.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СИНХРОННА МАШИНА ЯК ПРИСТРІЙ КОМПЕН- САЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	8
1.1 Компенсація реактивної потужності	8
1.2 Будова і принцип роботи синхронної машини	9
1.3 Робота в режимі двигуна	11
1.4 Робота в режимі генератора	15
1.5 Робота в режимі компенсатора	17
1.6 Система автоматичного регулювання збудження синхронного двигуна	19
1.7 Розрахунок та побудова характеристик синхронного двигуна	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КАР'ЄРУ	28
2.1 Розрахункове навантаження	28
2.2 Вибір трансформатора підстанції 10/0,4 кВ	30
2.3 Вибір перерізу проводів і розрахунок мереж	31
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТА- ЧАННЯ КАР'ЄРУ	34
3.1 Математична модель синхронної машини	34
3.2 Моделювання системи електропостачання	36
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	43
4.1 Аналіз забезпечення охорони праці на підприємстві	43
4.2 Моделювання процесу виникнення травм під час роботи з електроустановками	44 42
4.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	47
РОЗДІЛ 5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ	49
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	52

ВСТУП

Актуальність роботи. Землеснаряд являє собою плавучий розбірний пристрій, створений із чотирьох понтонів, з'єднаних між собою. Він оснащений напірним спайним ходом, ґрунтозабірним пристроєм із механічним і гідравлічним спущувачем. Основне призначення землеснаряду: - видобуток піщано-гравійної суміші, - розробка обводнених вторинних техногенних родовищ і гірничо-збагачувальних комбінатів за допомогою методів гідромеханізації, - очищення водосховищ, ставків, озер, річок від мулу, піску та інших осадів, - очищення промислових і сільськогосподарських відстійників, - налив земель під забудову, гребель, насипів і пляжів.

Головний насос приводиться в дію асинхронним двигуном. Використання синхронного двигуна замість асинхронного дозволяє зменшити споживання реактивної потужності. Однак реалізація такої заміни має свої обмеження через технічні умови, зокрема через особливості запуску. Крім того, синхронні двигуни значно дорожчі, що робить таку заміну вигідною лише в разі одночасного підвищення продуктивності агрегату—наприклад, за рахунок збільшення швидкості роботи приводу або за умови інших переваг.

Синхронні компенсатори найчастіше застосовуються в системних електромережах і можуть використовуватися в промислових мережах лише за погодженням з енергосистемою. З технічної точки зору ці пристрої мають майже ідеальні характеристики, окрім недостатньо швидкого регулювання в окремих випадках. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання реактивної потужності: від номінального значення Q_n у режимі генерації до 50-60% Q_n у режимі споживання. У ситуаціях короткого замикання, що супроводжуються дефіцитом реактивної потужності, синхронні машини здатні короткочасно значно збільшувати генерацію реактивної потужності (так зване "форсування"). Такі властивості синхронних машин суттєво підвищують динамічну стійкість системи.

В зв'язку з цим ми пропонуємо у даній кваліфікаційній роботі встановити на синхронний двигун систему регулювання збудження синхронного двигуна з

метою підтримання коефіцієнта потужності в мережі на заданому рівні без використання компенсувальних конденсаторних батарей.

Важливо здійснювати дослідження із застосуванням сучасних методів та інструментів аналізу, зокрема моделювання. Найкращим варіантом для цього буде використання програмного середовища MATLAB/Simulink.

Об'єкт дослідження: робота мережі електропостачання кар'єру із асинхронним та синхронним електродвигуном великої потужності.

Мета роботи: розрахувати електропостачання кар'єру, побудувати модель MATLAB/Simulink системи електропостачання та проаналізувати її роботу із асинхронним та синхронним електродвигуном великої потужності.

Предмет дослідження: робота мережі електропостачання кар'єру на предмет забезпечення належного значення коефіцієнта потужності мережі.

Завдання дослідження:

- проаналізувати питання синхронна машина як пристрій компенсації реактивної потужності;
- розрахувати електропостачання кар'єру та вибрати необхідні елементи мережі;
- в програмному середовищі MATLAB/Simulink побудувати модель мережі електропостачання кар'єру та провести порівняльне дослідження її роботи;
- розглянути питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях;
- провести економічний розрахунок.

РОЗДІЛ 1

СИНХРОННА МАШИНА ЯК ПРИСТРІЙ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності є фундаментальним завданням у сучасній електроенергетиці, спрямованим на оптимізацію режимів роботи електричних мереж. З фізичної точки зору, в колах змінного струму енергія не лише передається від джерела до навантаження для виконання корисної роботи (активна потужність P), але й постійно циркулює між генератором та накопичувачами енергії в колі — індуктивностями та ємностями. Ця обмінна потужність називається реактивною (Q). Вона необхідна для створення електромагнітних полів у електродвигунах, трансформаторах та лініях електропередач, проте її надмірне протікання через мережу викликає низку негативних явищ.

Математично повна потужність S , яку генерує джерело, пов'язана з активною та реактивною складовими через геометричну суму векторів:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Активна потужність визначається як $P = S * \cos\varphi$, а реактивна — як $Q = S * \sin\varphi$, де кут φ — це фазовий зсув між струмом та напругою. Основною метою компенсації є зменшення кута φ (наближення $\cos\varphi$ до одиниці). Якщо в мережі переважає індуктивне навантаження (електродвигуни), струм відстає від напруги. Для компенсації необхідно підключити джерело ємнісної реактивної потужності, струм якого випереджає напругу, що дозволяє «розвантажити» лінію від реактивної складової струму.

Відсутність компенсації призводить до значних економічних та технічних втрат. По-перше, збільшується повний струм у провідниках, що за законом Джоуля-Ленца ($P_{\text{втрат}} = I^2 R$) призводить до квадратичного зростання втрат активної

енергії на нагрівання проводів. По-друге, протікання реактивної потужності спричиняє значні падіння напруги в лінії, що описується спрощеною формулою:

$$\Delta U \approx \frac{PR + QX}{U_{\text{ном}}}$$

де R — активний опір, а X — реактивний опір лінії. Як видно з формули, наявність великої величини Q прямо впливає на зниження напруги у споживача. Синхронна машина в цьому контексті виступає як унікальний, регульований пристрій, здатний динамічно змінювати величину та знак реактивної потужності, підтримуючи стабільність енергосистеми.

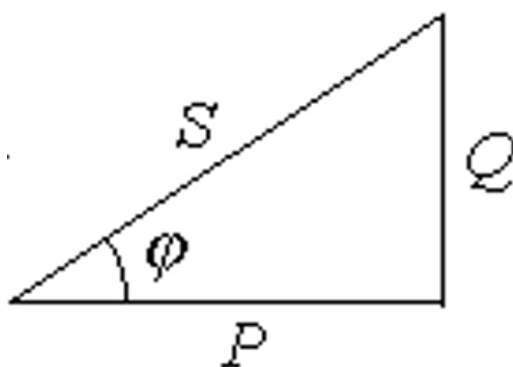


Рисунок 1.1 — Трикутник потужностей

1.2 Будова і принцип роботи синхронної машини

Синхронна машина являє собою складний електромеханічний перетворювач енергії, конструкція якого базується на взаємодії двох основних елементів: нерухомого статора та рухомого ротора. Статор синхронної машини, який часто називають якорем, конструктивно подібний до статора асинхронного двигуна. Його основою є шихтований сердечник, набраний з ізольованих листів електротехнічної сталі для мінімізації втрат на вихрові струми. У пазах сердечника розміщується трифазна обмотка, зсунута у просторі на 120 електричних градусів. Саме ця обмотка підключається до зовнішньої мережі змінного струму і, залежно від режиму роботи, або сприймає електричну енергію, створюючи обертове магнітне поле, або генерує електрорушійну силу (ЕРС) під дією поля ротора.

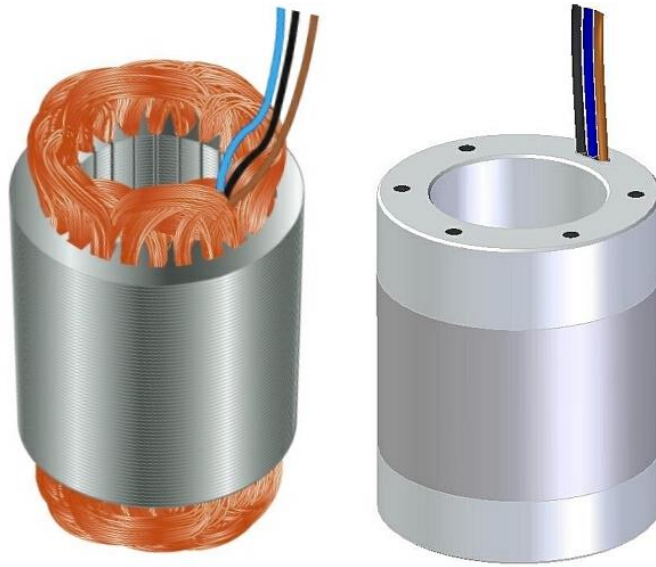


Рисунок 1.2 — Будова статора синхронної машини з трифазною обмоткою

Ротор, або індуктор, є обертовою частиною машини, на якій розташована обмотка збудження. Ця обмотка живиться постійним струмом від зовнішнього джерела — збудника, яким може слугувати генератор постійного струму або сучасна тиристорна система. Протікання постійного струму через обмотку ротора перетворює його на потужний електромагніт із фіксованою полярністю полюсів (N-S). Конструктивно ротори поділяються на два типи: явнополюсні, де полюси чітко виступають над поверхнею (використовуються в тихохідних гідрогенераторах), та неявнополюсні, які мають циліндричну форму для забезпечення механічної міцності при високих швидкостях обертання (характерні для турбогенераторів).

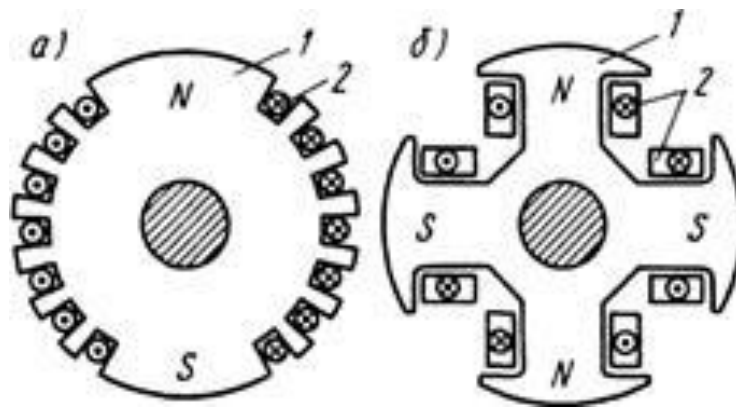


Рисунок 1.3 — Ротори синхронних неявнополюсної (а) та явнополюсної (б) машин: 1 — осердя ротора; 2 — обмотка збудження

Принцип роботи синхронної машини ґрунтується на електромагнітній взаємодії між обертовим магнітним полем статора та постійним магнітним полем ротора. Коли по обмотці статора протікає трифазний струм, виникає магнітне поле, що обертається з синхронною швидкістю n_1 , яка прямо пропорційна частоті мережі f і обернено пропорційна числу пар полюсів p ($n_1 = 60f/p$). Оскільки ротор є електромагнітом, його полюси притягуються до різноіменних полюсів обертового поля статора. У усталеному режимі виникає ефект «магнітного зчеплення»: ротор обертається з тією ж кутовою швидкістю, що й поле статора. Ця жорстка прив'язка швидкості обертання ротора до частоти мережі є ключовою характеристикою, що відрізняє синхронні машини від асинхронних.

Унікальність синхронної машини полягає в можливості керування її електромагнітними параметрами через зміну струму збудження ротора. Змінюючи величину постійного струму в обмотці ротора, можна змінювати величину електрорушійної сили (ЕРС), що індукується в статорі. Це, в свою чергу, не впливає на швидкість обертання ротора (яка залишається незмінною і синхронною), але кардинально змінює фазові співвідношення між струмом і напругою статора. Саме ця властивість дозволяє машині працювати не лише як джерело активної енергії, але і як потужний регулятор реактивної потужності, здатний як споживати її з мережі, так і генерувати в мережу.

1.3 Робота в режимі двигуна

Синхронний двигун є унікальним електромагнітним механізмом, який перетворює електричну енергію змінного струму в механічну енергію з абсолютно постійною кутовою швидкістю, що не залежить від величини навантаження на валу. На відміну від асинхронних двигунів, де обертання можливе лише за наявності різниці швидкостей (ковзання) між полем статора та ротором, ротор синхронного двигуна в усталеному режимі жорстко «зчеплений» з обертовим магнітним полем статора. Цей зв'язок має магнітну природу: різноіменні полюси поля статора і поля ротора взаємно притягуються, утворюючи невидиму, але пружну електромагнітну ланку. Швидкість обертання ротора n визначається виключно

частотою живильної мережі f і кількістю пар полюсів p ($n = 60f/p$), що робить ці двигуни незамінними для механізмів, які вимагають високої стабільності обертання, таких як поршневі компресори, металургійні прокатні стани та потужні насосні агрегати.

Однак, ця жорстка синхронізація створює серйозну проблему при запуску. Оскільки статорне поле починає обертатися з номінальною швидкістю миттєво після вмикання в мережу, масивний ротор через свою інерцію не може розігнатися за долі секунди. У цей момент на ротор діє знакозмінний момент: полюси статора пролітають повз полюси ротора з величезною швидкістю, штовхаючи його то вперед, то назад, що в середньому дає нульовий пусковий момент. Тому для запуску використовується асинхронний метод. У полюсних наконечниках ротора монтується спеціальна короткозамкнена пускова (демпферна) обмотка, аналогічна «білячій клітці» асинхронного двигуна. При подачі напруги на статор машина розганяється як асинхронний двигун. Коли швидкість ротора наближається до підсинхронної (близько 95% від $n_{\text{ном}}$), в обмотку збудження подається постійний струм. Виникає потужний синхронізуючий момент, який ривком втягує ротор у синхронізм, після чого пускова обмотка припиняє свою дію, оскільки відносна швидкість поля та ротора стає нульовою.

Роботу навантаженого синхронного двигуна найкраще описує фізична модель «магнітної пружини». У режимі холостого ходу осі магнітних полів статора і ротора збігаються. Коли до валу прикладається гальмівний момент навантаження $M_{\text{мех}}$, ротор починає фізично зміщуватися назад проти напрямку обертання, розтягуючи цю умовну магнітну пружину. Кут розбіжності між віссю поля статора і віссю полюсів ротора називається кутом навантаження θ . Зі збільшенням цього кута зростають електромагнітні сили притягання, що намагаються повернути ротор у вихідне положення, тим самим створюючи обертовий момент $M_{\text{ем}}$. Залежність моменту від кута описується синусоїдальним законом:

$$M_{\text{ем}} = \frac{mUE_0}{\omega X_d} * \sin\theta$$

де ω — кутова частота мережі. Максимальний момент, який може розвинути двигун, досягається при куті $\theta = 90^\circ$. Якщо механічне навантаження

перевищить це значення, «магнітна пружина» розривається, двигун випадає із синхронізму, що супроводжується значними кидками струму та механічними ударами, і спрацьовує аварійний захист. При різких змінах навантаження ротор може здійснювати затухаючі коливання навколо положення рівноваги (хитання), які гасяться згаданою вище демпферною обмоткою.

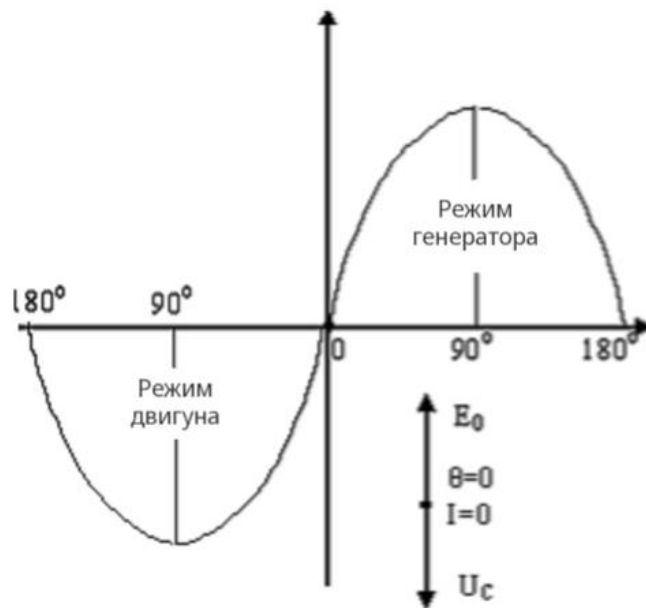


Рисунок 1.4 — Кутова характеристика

Найважливішою властивістю синхронного двигуна в контексті теми є можливість керування реактивною потужністю Q через зміну струму збудження I_f . Це явище базується на взаємодії напруги мережі U та електрорушійної сили E_0 , індукованої полем ротора в статорі.

1. Режим недозбудження ($E_0 < U$). Якщо струм ротора малий, магнітне поле ротора слабке. Щоб підтримати необхідний магнітний потік у машині, вона починає споживати реактивний намагнічуючий струм з мережі. Двигун працює з відстаючим $\cos\phi$, подібно до індуктивності (як звичайний асинхронний двигун).
2. Режим нормального збудження. Струм збудження підібраний так, що E_0 компенсує реактивну складову. Струм статора мінімальний і повністю

активний ($\cos\varphi = 1$). Це найбільш економічний режим для самої машини (мінімум втрат на нагрівання).

3. Режим перезбудження ($E_0 > U$). Якщо значно збільшити струм ротора, його магнітне поле стає надлишковим. За законом Ленца, в статорі виникає розмагнічуючий реактивний струм, який випереджає напругу. У цьому режимі двигун стає генератором реактивної потужності ($Q > 0$, ємнісний характер).

Саме режим перезбудження використовується для компенсації реактивної потужності промислових підприємств. Встановлюючи потужні синхронні двигуни для приводу насосів чи компресорів і переводячи їх у режим перезбудження, інженери вбивають двох зайців: виконують корисну механічну роботу і одночасно компенсують індуктивну реактивну потужність («сміттєву енергію») від безлічі дрібних асинхронних двигунів та зварювальних апаратів, підключених до тієї ж мережі. Це покращує загальний коефіцієнт потужності підприємства та стабілізує напругу на шинах підстанції.

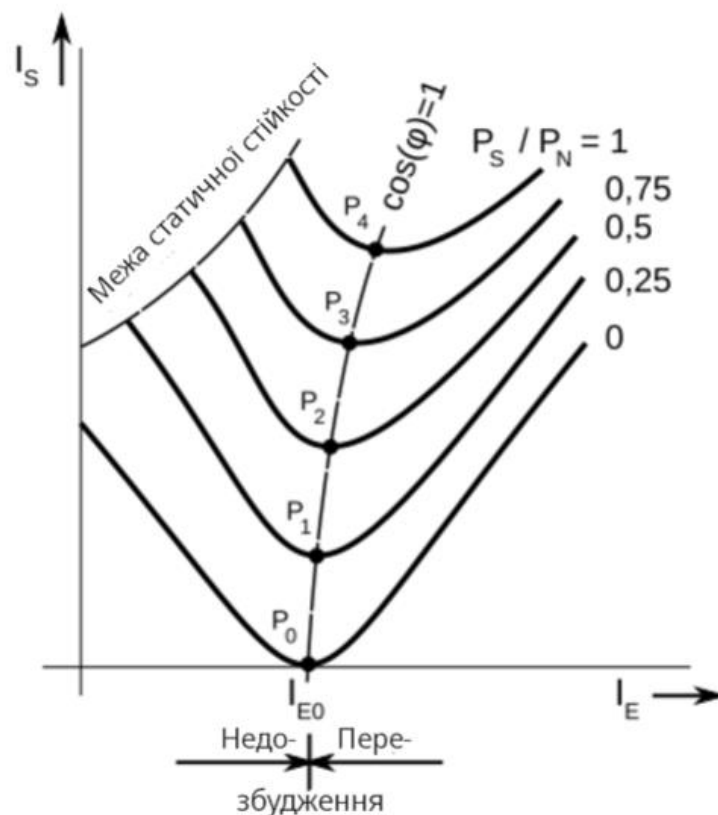


Рисунок 1.5 — V-подібні характеристики синхронного двигуна

1.4 Робота в режимі генератора

Генераторний режим є базовим станом синхронної машини, в якому вона перетворює механічну енергію первинного двигуна (турбіни) на електричну енергію змінного струму. Фізична основа цього процесу базується на законі електромагнітної індукції Фарадея. Ротор машини, що являє собою потужний електромагніт, обертається з частотою n , створюючи обертовий магнітний потік Φ . Цей потік перетинає провідники нерухомої статорної обмотки, індукуючи в ній електрорушійну силу (ЕРС). Значення цієї ЕРС (E_0) є фундаментальною величиною для керування режимами роботи і визначається рівнянням:

$$E_0 = 4,44 * f * w * k_{об} * \Phi$$

де f — частота мережі, w — кількість витків у фазі, $k_{об}$ — обмотковий коефіцієнт. Оскільки частота мережі є жорстко фіксованим параметром (50 Гц), єдиним способом оперативного керування величиною ЕРС є зміна магнітного потоку Φ , що досягається регулюванням струму в обмотці збудження ротора (I_f). Саме цей важіль керування дозволяє генератору виступати джерелом реактивної потужності.

Найскладнішим фізичним процесом у навантаженому генераторі є реакція якоря. Коли до генератора підключають навантаження, по обмотках статора починає протікати трифазний струм I , який створює власне магнітне поле статора (поле якоря), що обертається синхронно з ротором. Це поле накладається на основне поле ротора, суттєво змінюючи результуючу магнітну картину в машині. Характер цього впливу залежить від фазового зсуву φ між струмом і ЕРС (характеру навантаження). При чисто активному навантаженні поле якоря діє поперечно до поля полюсів, викривляючи силові лінії (поперечна реакція). Однак при індуктивному навантаженні (яке переважає в мережах) виникає поздовжня розмагнічуюча реакція якоря: поле статора направлене зустрічно до поля ротора, що призводить до автоматичного зниження напруги на клеммах генератора. Щоб компенсувати це падіння і втримати напругу на номінальному рівні, системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ) змушені суттєво збільшувати струм ротора.

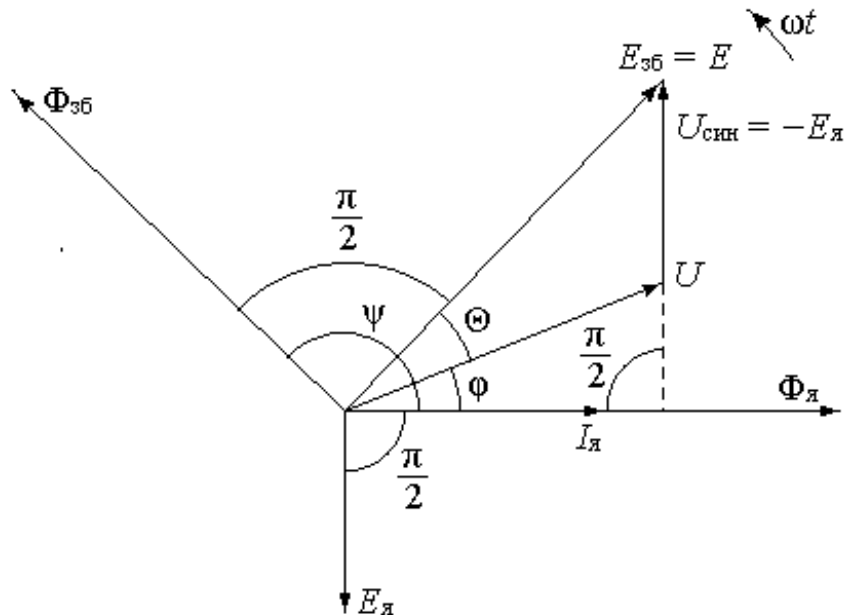


Рисунок 1.6 — Векторна діаграма синхронного генератора

Керування потоками потужності в синхронному генераторі здійснюється через два незалежних канали. Активна потужність P регулюється виключно зміною обертового моменту на валу турбіни. Збільшення подачі пари чи води призводить до того, що ротор починає фізично випереджати вектор напруги мережі на кут навантаження Δ . Залежність активної потужності від цього кута описується рівнянням:

$$\frac{mUE_0}{X_d} \sin \delta$$

Реактивна потужність Q , яка є предметом даного реферату, не залежить від моменту на валу, а визначається різницею між модулем ЕРС генератора та напругою мережі. Математично це виражається формулою:

$$Q = \frac{mU}{X_d} (E_0 \cos \delta - U)$$

З цієї формули випливає фундаментальний принцип компенсації: якщо $E_0 \cos \delta > U$ (що досягається збільшенням струму збудження, режим перезбудження), значення Q стає позитивним — генератор видає реактивну потужність у мережу, працюючи як конденсаторна батарея. Якщо ж зменшити струм збудження так, що $E_0 \cos \delta < U$ (режим недозбудження), Q стає від'ємним — генератор споживає реактивну потужність, працюючи як індуктивність.

Здатність генератора компенсувати реактивну потужність не є безмежною і обмежується так званою діаграмою потужності (P-Q діаграмою). Ця область допустимих режимів окреслена трьома фізичними факторами. По-перше, максимальний струм збудження обмежений теплостійкістю ізоляції обмотки ротора (верхня межа генерації Q). По-друге, повний струм статора ($S = \sqrt{P^2 + Q^2}$) обмежений нагріванням обмотки статора (дуга кола). По-третє, робота в режимі споживання реактивної потужності (глибоке недозбудження) обмежена умовою статичної стійкості. При надто слабкому полі ротора магнітний зв'язок зі статором слабшає, і при найменшому збуренні генератор може випасти із синхронізму. Тому в енергосистемах генератори зазвичай працюють у режимі перезбудження ($\cos\varphi \approx 0.8...0.9$ індуктивний), генеруючи і активну, і реактивну енергію для покриття потреб споживачів.

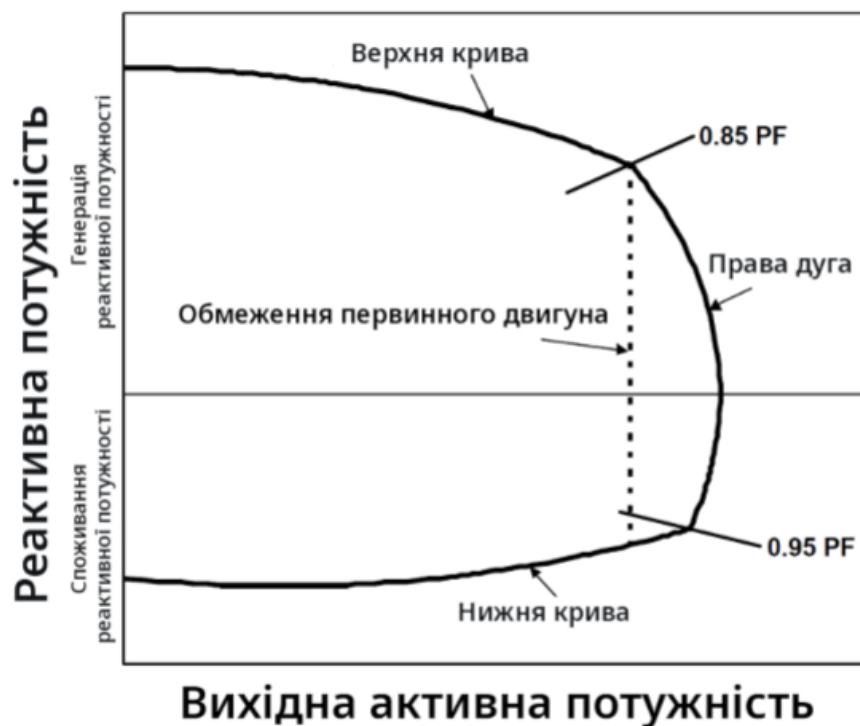


Рисунок 1.7 — P-Q діаграма

1.5 Робота в режимі компенсатора

Синхронний компенсатор (СК) — це спеціалізована електрична машина, яка конструктивно являє собою синхронний двигун полегшеної конструкції, що

працює в режимі холостого ходу без механічного навантаження на валу. Його єдиним призначенням є генерація або споживання реактивної потужності для потреб енергосистеми. Вал синхронного компенсатора не з'єднаний з жодним робочим механізмом, тому активна потужність, яку він споживає з мережі (P), є мінімальною і витрачається лише на покриття внутрішніх втрат (тертя в підшипниках, вентиляція, нагрівання обмоток та перемагнічування сталі). Зазвичай ці втрати становлять лише 1-2% від номінальної повної потужності машини, що робить її високоефективним регулятором.

Принцип роботи компенсатора базується на розглянутих раніше V-подібних характеристиках. Оскільки активне навантаження практично відсутнє ($P \approx 0$), робоча точка компенсатора завжди знаходиться на нижній частині V-подібних кривих. Це дає змогу використовувати весь діапазон допустимих струмів статора виключно для створення реактивної потужності. У режимі перезбудження (коли струм ротора великий і $E_0 > U$) компенсатор генерує реактивну потужність у мережу, працюючи як потужна конденсаторна батарея. Цей режим є основним, оскільки більшість промислових навантажень мають індуктивний характер і потребують компенсації. У режимі недозбудження (коли струм ротора малий і $E_0 < U$) компенсатор споживає реактивну потужність, замінюючи собою реактор (котушку індуктивності). Цей режим використовується для стабілізації напруги в високовольтних лініях електропередач у періоди мінімальних навантажень (наприклад, вночі), щоб запобігти небезпечному підвищенню напруги через зарядну потужність лінії.

Головною перевагою синхронного компенсатора порівняно зі статичними конденсаторними батареями (які також використовуються для компенсації) є можливість плавного автоматичного регулювання реактивної потужності. Змінюючи струм збудження, можна точно встановити будь-яке значення Q — від максимальної генерації до максимального споживання, тоді як конденсаторні установки вмикаються лише ступенями. Крім того, при аварійному зниженні напруги в мережі потужність конденсаторів падає квадратично ($Q \sim U^2$), що погіршує ситуацію, тоді як синхронний компенсатор за рахунок форсування збудження (швидкого збільшення струму ротора) здатен підтримувати і навіть збільшувати

видачу реактивної потужності, «підпираючи» напругу і рятуючи енергосистему від колапсу (лавини напруги).

Однак синхронні компенсатори мають і недоліки: вони дорожчі за конденсатори, складніші в експлуатації (наявність обертових частин вимагає обслуговування підшипників та системи охолодження) і споживають більше активної електроенергії на власні потреби. Тому сучасні тенденції в енергетиці зміщуються в бік використання статичних тиристорних компенсаторів (СТК), але на вузлових підстанціях та великих металургійних заводах синхронні машини залишаються незамінними завдяки своїй інерційності та здатності підвищувати динамічну стійкість мережі.



Рисунок 1.8 — Синхронний компенсатор

1.6 Система автоматичного регулювання збудження синхронного двигуна

Землеснаряд є розбірним плавучим пристроєм, що складається з чотирьох понтонів, з'єднаних за допомогою міжпонтонних вузлів. Пристрій оснащений напірним спайним ходом, ґрунтозабірним механізмом із комбінованим механічним і гідравлічним спущувачем. До його складу також входить ґрунтонасос ГРУ

800/40, який забезпечує продуктивність 800 м³/год по пульпі з напором у 40 метрів.

Основне призначення землеснаряду: - добування піщано-гравійної суміші; - розробка обводнених вторинних техногенних родовищ та матеріалів гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом гідромеханізації; - очищення водосховищ, ставків, озер і річок від мулу, піску й інших відкладень; - очищення промислових і сільськогосподарських відстійників; - налив територій під забудову, створення гребель, насипів і пляжів.

Головний насос землеснаряду приводиться в дію асинхронним електродвигуном. Наша пропозиція полягає в заміні цього двигуна на синхронний типу СД2-85/29-10.

Основні характеристики нового двигуна: - потужність 250 кВт; - номінальна напруга живлення 0,38 кВ; - номінальна швидкість обертання 750 об/хв; - коефіцієнт корисної дії 93,2%; - кратність максимального моменту $M_{\max}/M_n = 1,7$; - кратність пускового струму $I_p/I_r = 5,5$; - кратність пускового моменту $M_p/M_n = 1,2$; - напруга збудження 33 В; - струм збудження 133 А; - момент інерції 45 кг·м²; - маса 2,14 т.

Окрім заміни двигуна, ми також пропонуємо встановлення системи автоматичного регулювання коефіцієнта потужності мережі для його підвищення, оскільки чинний коефіцієнт є недостатньо високим.

Електротехнічна промисловість випускає комплектні тиристорні збудники з автоматичними регуляторами збудження серій ТЕ8-320 і КТУ. Збудники серії ТЕ8-320 мають два різновиди: моделі ТЕ8-320-4 призначені для збудження синхронних двигунів (СД), що працюють у режимах зі стабільним навантаженням і не потребують автоматичного регулювання струму збудження, тоді як моделі ТЕ8-320-5 розраховані на СД із різкозмінними навантаженнями, що потребують автоматичного регулювання збудження (АРВ).

У збудниках серії ТЕ8-320-4 реалізовані ручний та аварійний режими управління струмом збудження, а моделі ТЕ8-320-5 додатково оснащені автоматичним режимом. У ручному режимі керування збудник забезпечує: - запуск синхронного двигуна з автоматичною подачею збудження за умови контролювання

струму статора; - плавне регулювання струму збудження в межах від 0,3 до 1,4 номінального значення з можливістю підстроювання граничних рівнів; - обмеження мінімальної напруги збудження в межах 0–0,5 номінального значення; - обмеження максимального струму збудження в межах 0,8–1,75 номінального значення; - захист обмотки ротора від тривалих перевантажень за струмом; - форсування напруги до рівня 1,75 номінального значення при живленні від номінальної напруги мережі, при цьому форсування активується за зниження напруги статора до 15–20% від номінала; - форсоване погашення поля ротора як при відключенні двигуна, так і в разі перебоїв у живленні або наявності сигналу на гасіння поля.

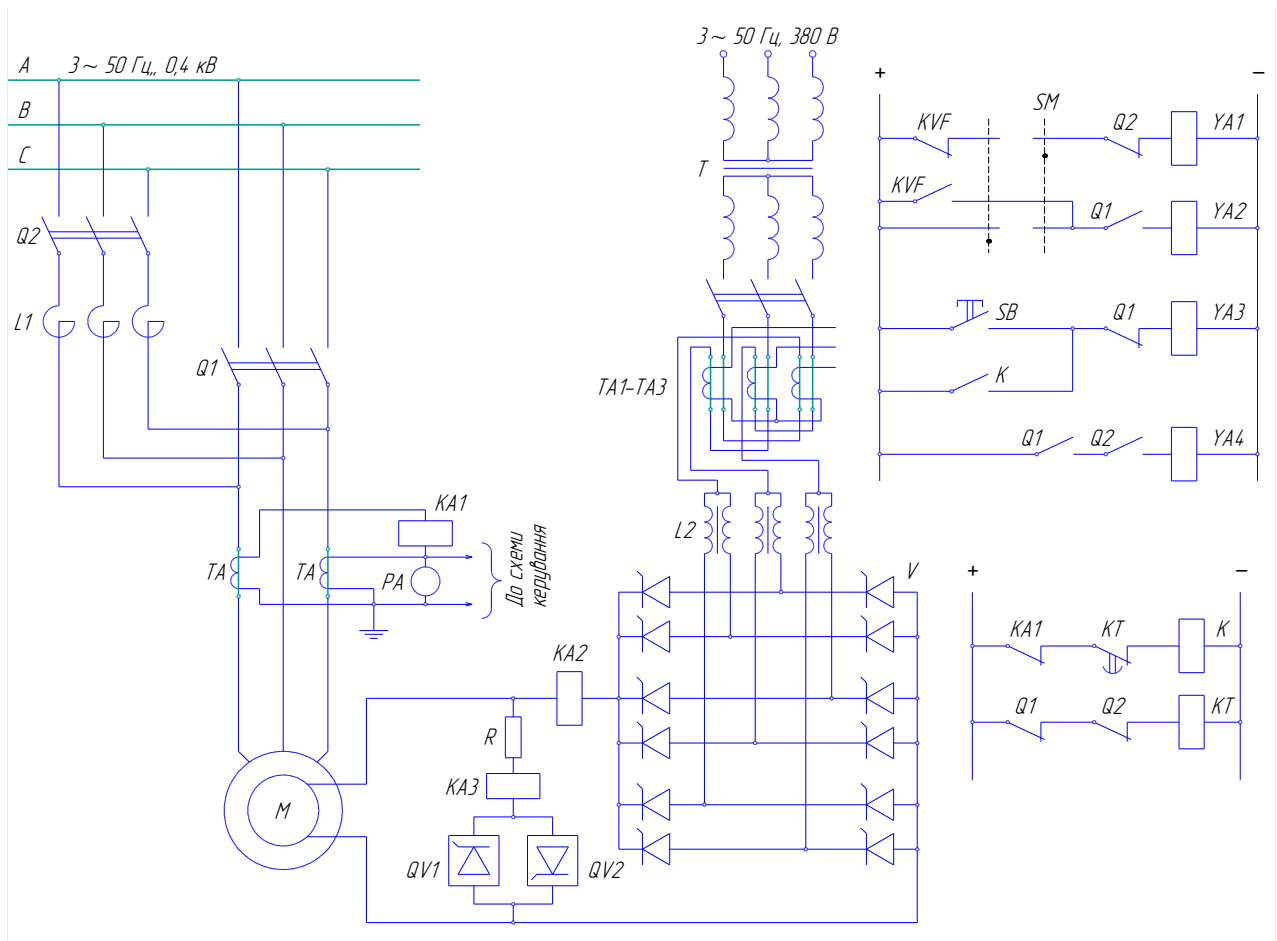


Рисунок 1.9 – Схема пуску електроприводу

В автоматичному режимі керування, окрім функцій ручного режиму, збудник додатково забезпечує: - стабілізацію струму збудження; - автоматичне

регулювання за одним чи кількома із наступних параметрів: струмом збудження, напругою статора, повним струмом статора, кутом ϕ вузла навантаження, реактивним або активним струмом статора, а також внутрішнім кутом машини.

У режимі аварійного керування збудник забезпечує лише плавне регулювання струму збудження в діапазоні від нуля до форсованого значення із можливістю налаштувати граничні межі. Збудник обладнаний наступними видами електричних захистів: від внутрішніх та зовнішніх коротких замикань, від перегріву пускового опору, а також від тривалого асинхронного режиму роботи двигуна.

Конструктивно збудник виконаний у формі металевої шафи з двостороннім доступом для обслуговування, а також окремо встановленого силового трансформатора типу ТСЗВ. Шафа збудника включає такі компоненти: - тиристорний випрямляч; - пусковий опір із тиристорним ключем; - релейну панель керування; - електронну систему керування (ЕСУ); - автоматичний регулятор збудження.

У спрощеній принциповій схемі керування пуском синхронного двигуна (СД), наведеної на рис. 1.9, передбачено прямий або реакторний пуск та ввімкнення збудження після завершення пускового процесу з контролем струму статора та завданням часу. Обмотка статора СД М підключається до мережі живлення напряму або через реактори $L1$ за допомогою вимикачів $Q1$ і $Q2$. Вмикання виконується за допомогою електромагнітів $YA1$ і $YA3$, а вимикання — електромагнітами $YA2$ і $YA4$. Керуючі сигнали для ввімкнення та вимкнення подаються ключем управління SM та кнопкою SB .

Тиристорний випрямляч збудження V сконструйований за трифазною нульовою або мостовою схемою з використанням шести чи дванадцяти тиристорів, захищених RC -ланками. Живлення випрямляча здійснюється від мережі змінного струму напругою 380 В і частотою 50 Гц через трансформатор T . У коло живлення інтегровані дільники струму $L2$ для вирівнювання струмів між паралельно підключеними тиристорами однієї фази.

Керування тиристорами випрямляча організовано за вертикальним принципом із регульованим кутом у діапазоні $0-90^\circ$ для режиму випрямлення та $150-170^\circ$ для інверсного режиму. Пусковий (розрядний) резистор R під'єднується

паралельно обмотці збудження СД на період запуску або асинхронного режиму роботи за допомогою безконтактних тиристорних ключів QV1 і QV2. Контроль струму збудження під час запуску та роботи здійснюється за допомогою струмових реле КА2 і КА3.

При відключенні обмотки статора синхронного двигуна від мережі живлення (у процесі його зупинки), тобто при розмиканні Q1 за командою ключа SM або реле захисту KVF, активується реле інвертування КТ, яке переводить тиристорний збудник у режим інвертування (на схемі не вказано). Це забезпечує прискорене гасіння магнітного поля двигуна. Функціональна схема системи регулювання збудження двигуна показана на рисунку 1.10.

Схема складається з синхронного двигуна (СД), який живиться від шин високої напруги трансформаторної підстанції через трансформатор Т1, тиристорного збудника UL із системою імпульсно-фазового керування AUL, що отримує живлення від мережі напругою 380 В, частотою 50 Гц через трансформатор Т2, а також автоматичного регулятора збудження.

Регулятор збудження включає підсилювальні пристрої з підсилювачами напруги А1 та струму А2, функціональні перетворювачі у вигляді датчика статичного режиму УС, датчика кута U_{ϕ} і обмежувача струму ротора ААГ, які формують сигнали параметрів регулювання. Крім того, він містить вимірювальні пристрої для контролю напруги та струму статора й ротора двигуна.

У склад вимірювальних пристроїв входять датчик напруги статора UV, приєднаний через трансформатор напруги TV15; датчик струму живлення UAV і датчик струму статора UAS, що підключені до трансформаторів струму ТА4-ТА8; а також датчик струму ротора VAg, приєднаний до трансформаторів струму ТА1—ТА3. Датчик статичного режиму генерує сигнали керування постійного струму, які пропорційні напрузі статора та одній із наступних величин: повному, реактивному або активному струму статора, кутах зсуву фаз мережі фп і двигуна фд, а також реактивному струму вузла навантаження мережі. Датчик кута U_{ϕ} працює аналогічно УС і використовується для вимірювання кута навантаження в тих ситуаціях, коли УС контролює інші параметри.

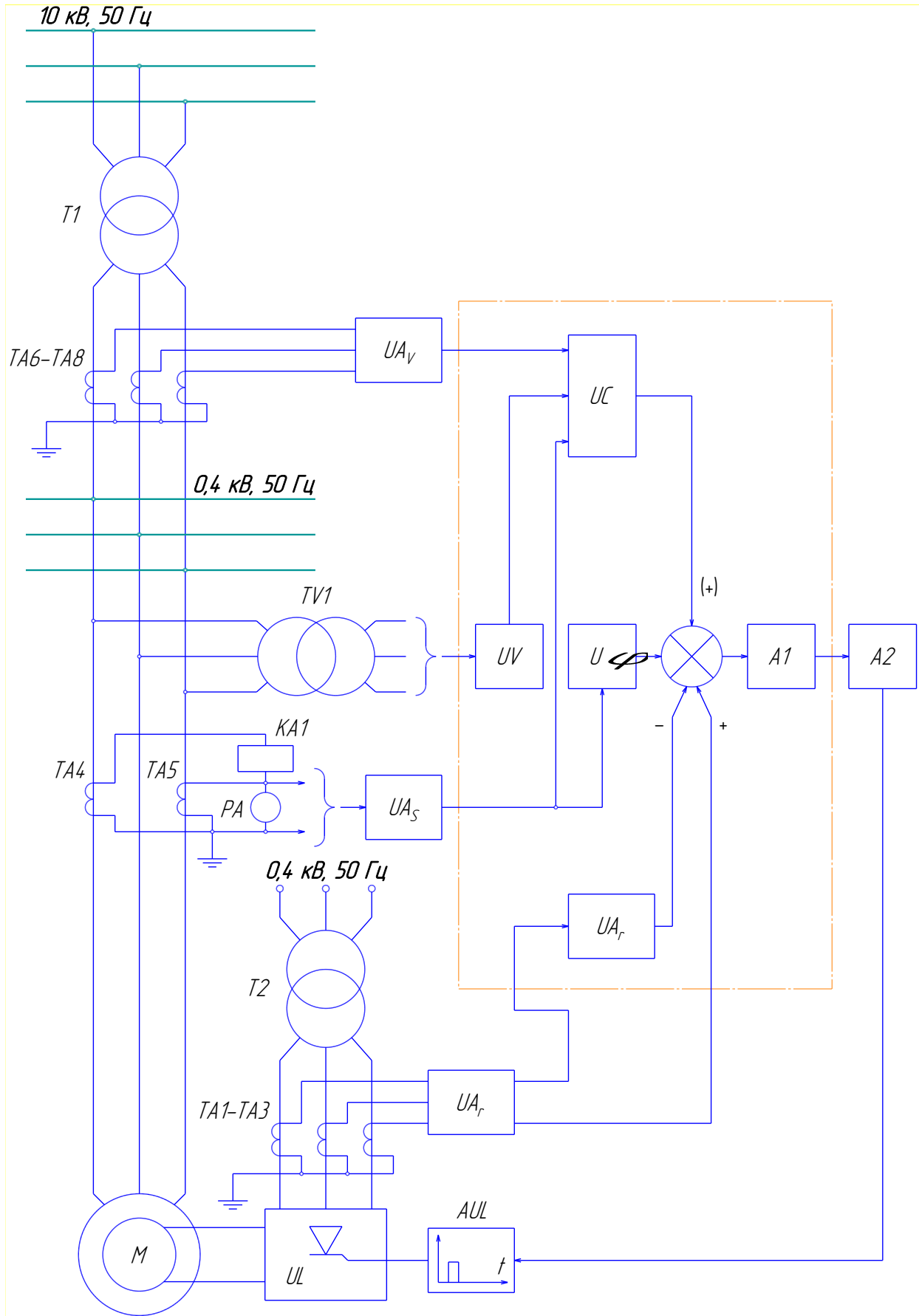


Рисунок 1.10 – Схема функціональна регулювання збудження синхронного двигуна типу TE8

Обмежувач струму ротора ААГ запобігає перевищенню його номінального значення. У разі перевищення він із затримкою часу, визначеною реле часу, активує від'ємний зворотній зв'язок по струму ротора, що обмежує його значення до номінального. Сигнали керування з виходів датчиків UC, UV, Uφ та UAr обробляються підсумовуючим підсилювачем напруги А1. Сумарний сигнал, посилений підсилювачем струму А2, передається на систему фазового керування АUL, яка формує необхідні кути керування тиристорами збудника та відповідно регулює струм ротора синхронного двигуна. Залежно від налаштувань регулятора збудження можна реалізувати різні алгоритми управління збудженням.

Основним завданням усіх режимів роботи є стабілізація струму збудження синхронного двигуна при зміні напруги живлення збудника та температури середовища. Універсальними елементами для всіх алгоритмів є датчик статичного режиму UC і підсилювачі А1 та А2. Використання інших пристроїв та датчиків залежить від функціонального призначення регулятора збудження й конкретного алгоритму управління.

У тиристорному збуднику ТЕ8-320/5 передбачено системи захисту синхронного двигуна й схеми управління та збудження для протидії зовнішнім і внутрішнім коротким замиканням, тривалому асинхронному ходу та обриву обмоток ротора. Ці захисти також контролюють струм ротора (реле КА1—КА3 і KVF) та реагують на небезпечний випадок втрати синхронізму двигуном. У разі спрацювання будь-якого із засобів захисту активується реле KVF, яке приводить у дію електромагніт YA2 для відключення вимикача Q1 і знеструмлення синхронного двигуна.

1.7 Розрахунок та побудова характеристик синхронного двигуна

Номінальна кутова швидкість обертання

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} \quad (1.1)$$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,75 \text{ рад/с.}$$

Значення номінального моменту синхронного двигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (1.2)$$

$$M_n = \frac{250000}{78,75} = 3174,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Величина максимального моменту

$$M_{\max} = 1,7 \cdot M_n \quad (1.3)$$

$$M_{\max} = 1,7 \cdot 3174,6 = 5396,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Навантажувальна характеристика

$$M(\Theta) = M_{\max} \cdot \sin \Theta \quad (1.4)$$

Розрахунок та побудову графічних залежностей здійснюємо у програмному середовищі MathCad (рис.1.11).

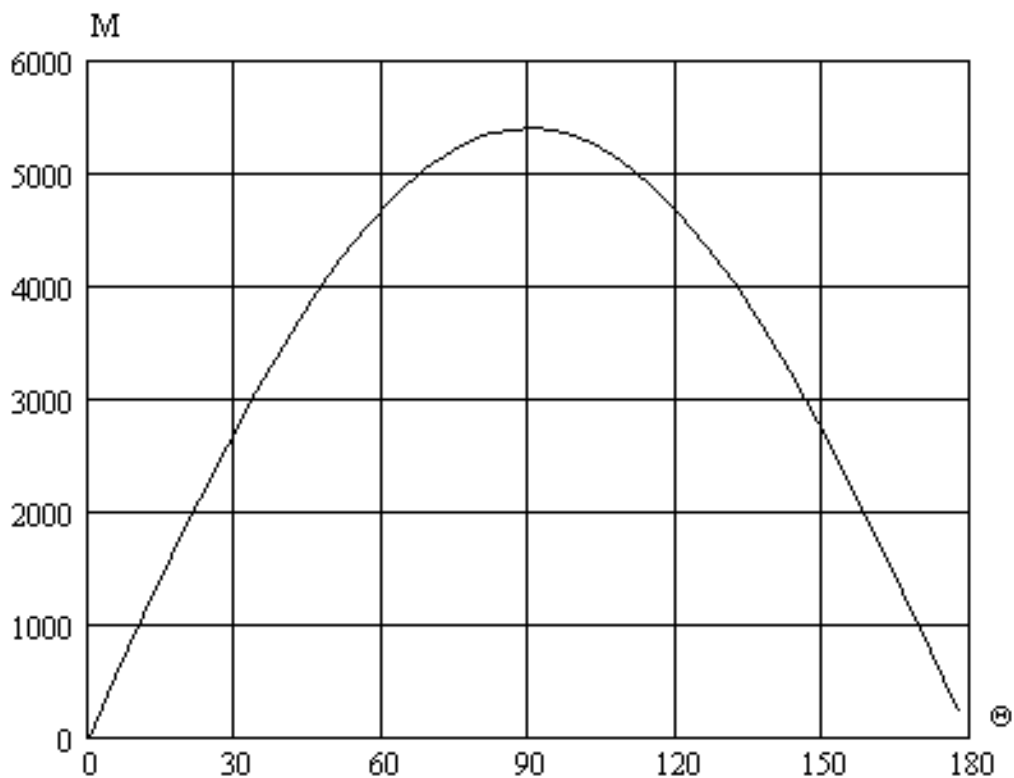


Рисунок 1.11 – Графічна залежність навантажувальної характеристики синхронного двигуна

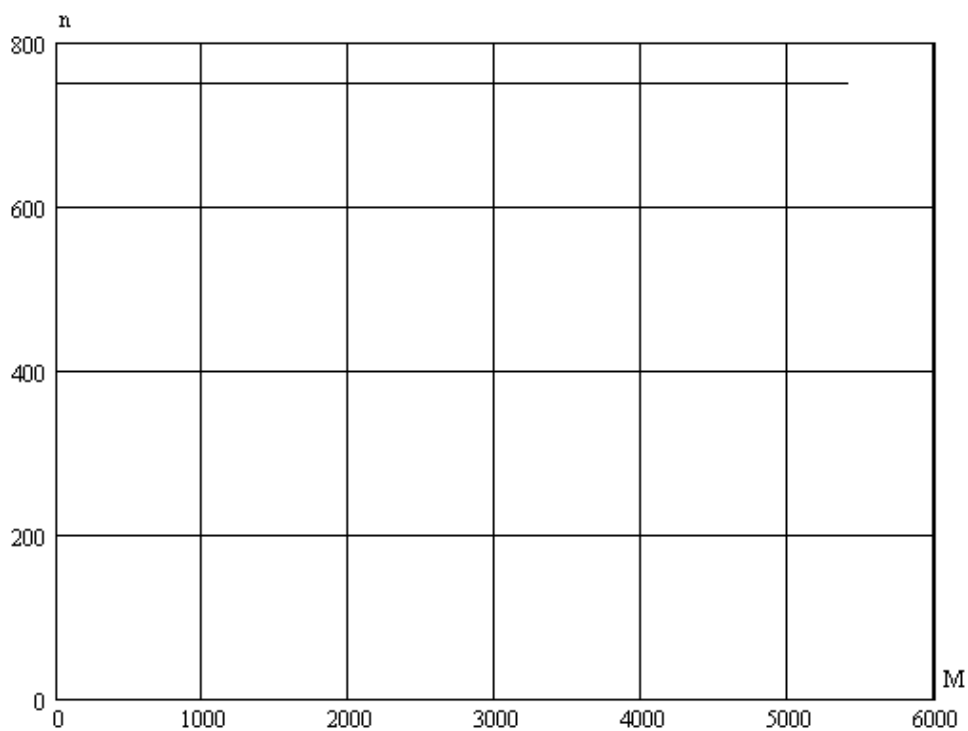


Рисунок 1.12 – Графічна залежність механічної характеристика синхронного двигуна

Механічна характеристика синхронного двигуна має лінійну характеристику, яка не залежить від швидкості обертання (рис. 1.12). Кут навантаження міняється в межах від $0 - 180^\circ$.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КАР'ЄРУ

Основним елементом системи електропостачання кар'єру є землеснаряд. Для забезпечення його електроживлення на території кар'єру передбачено установку окремої трансформаторної підстанції. Живлення цієї підстанції 10/0,4 кВ здійснюється через повітряну лінію електропередач напругою 10 кВ, яка з'єднує її із районною трансформаторною підстанцією, розташованою на відстані 4 км.

Оскільки дана трансформаторна підстанція призначена виключно для одного споживача, на стороні низької напруги (0,4 кВ) вона оснащена лише однією лінією, виконаною з гнучкого мідного кабелю. Силовий кабель підключено до ввідного щита, розташованого безпосередньо на земснаряді. Від ввідного щита живлення через кабелі подається до розподільних щитів. У складі цих щитів знаходяться як апаратура захисту, так і пристрої управління. До щитів також підключені силові кабелі, які забезпечують електроживлення встановлених електроприводів.

2.1 Розрахункове навантаження

Для визначення розрахункових навантажень використовували усталені значення потужностей зазначених об'єктів. Ці значення отримано на основі технологічних карт виробничого процесу. Крім того, було враховано рівень завантаженості споживачів та порядок їх ввімкнення.

Таблиця 2.1 –Значення потужності

Вузол	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{уст}$	250	13	5	5	13	20	20	5

Для визначення розрахункових навантажень ліній попередньо формується таблиця підключення навантажень до різних ліній мережі. Кожен стовпець

таблиці відповідає певному порядковому номеру та демонструє суму максимальних активних навантажень, які живляться через конкретну лінію. Завдяки цій таблиці можна визначити розрахункові навантаження для кожної з ліній електромережі напругою 0,38 кВ.

Таблиця 2.2 – Розрахункові значення навантаження ліній

Лінія	1	2	3	4	5	6	7	8
P _{розр}	250	13	5	5	13	20	20	5

Значення повних розрахункових навантажень мережі 0,38 кВ визначаються на основі відповідних показників коефіцієнтів потужності навантажень мережі, згідно з даними таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові значення повних навантажень мережі 0,38 кВ.

Лінія	1	2	3	4	5	6	7	8
S, кВА	271	14,1	5,4	5,4	14,1	21,7	21,7	5,4

Розрахункове реактивне навантаження ліній мережі 0,38 кВ:

$$Q_i = P_i \cdot \operatorname{tg} \phi, \text{кВАр} \quad (2.1)$$

Таблиця 2.4 – Розрахункове реактивне навантаження ліній мережі 0,38 кВ

Лінія	1	2	3	4	5	6	7	8
Q,кВАр	106,5	6,0	2,3	2,3	6,0	9,2	9,2	2,3

Розрахункове струмове навантаження:

$$I_i = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \text{А} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.5 – Розрахункове струмове навантаження мережі 0,38 кВ

Лінія	1	2	3	4	5	6	7	8
I, А	391	20,4	7,8	7,8	20,4	31,3	31,3	7,8

2.2 Вибір трансформатора підстанції 10/0,4 кВ

Розрахункова величина сумарного навантаження мережі 0,38 кВ:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 = \\ = 250 + 13 + 5 + 5 + 13 + 20 + 20 + 5 = 331 \text{ кВт}$$

Розглянемо процес визначення сумарної повної потужності мережі. З огляду на те, що передбачається встановлення системи автоматичної стабілізації коефіцієнта потужності на основі керованого збудження синхронного двигуна, у розрахунках враховуємо коефіцієнт потужності $\cos\phi=0,92$. Тепер здійснимо обчислення:

$$S_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\cos\phi}, \text{кВА}, \quad (2.3)$$

$$S_{\Sigma} = \frac{331}{0,92} = 360 \text{ кВА}.$$

З урахуванням допустимого тривалого перевантаження трансформатора визначимо розрахункове значення його потужності:

$$S_{розр} = S_T, \text{кВА}, \quad (2.4)$$

$$S_{розр} = S_T = 460 \text{кВА}.$$

Зовнішнє електроживлення може бути реалізоване лише через одну повітряну лінію напругою 10 кВ. На трансформаторній підстанції передбачається встановлення одного трансформатора з характеристиками 10/0,4 кВ. Принципова схема мережі представлена на рисунку 2.1.

Вибираємо трансформатор типу ТМ-630-10/0,4 кВ.

Таблиця 2.6 - Паспортні дані трансформатора ТМ-630-10/0,4 кВ.

$S_{ном}$	$U_{В ном}$	$U_{Н ном}$	Схема та група з'єднань	$\Delta P_{нх}$	$\Delta P_{кз}$	$U_{кз}$	$I_{нх}$
кВА	кВ	кВ		кВт	кВт	%	%
630	10	0,4	Y/Y _н -0	1,5	8,0	5,5	2,5

Приведені параметри трансформатора, до вищої напруги трансформатора :

- повний опір – $z_T = \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot 10^{-3}} = 9,0 \text{ Ом};$
- активний опір – $r_T = P_{кз} \cdot \frac{U_{Вном}^2}{S_{ном}^2 \cdot 10^{-3}} = 2,0 \text{ Ом};$

- реактивний опір – $x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = 8,8 \Omega$.

Для забезпечення живлення запроєктованої мережі напругою 0,38 кВ передбачено використання комплектної трансформаторної підстанції КТП-630-10/0,4 кВ. Підстанція сконструйована у вигляді блочного виконання, що включає основні компоненти: силовий трансформатор потужністю 630 кВА, розподільний пристрій для напруги 10 кВ і розподільний пристрій для напруги 0,38 кВ.

2.3 Вибір перерізу проводів і розрахунок мереж

Розрахунок мережі 10 кВ

Активна частина втрати напруги в магістралі високовольтної мережі:

$$\Delta U_p = \frac{x_o}{U_{ном}} Q \cdot l, \text{ В} \quad (2.5)$$

$$\Delta U_p = \frac{0,35}{10000} 143,8 \cdot 4000 = 20 \text{ В}$$

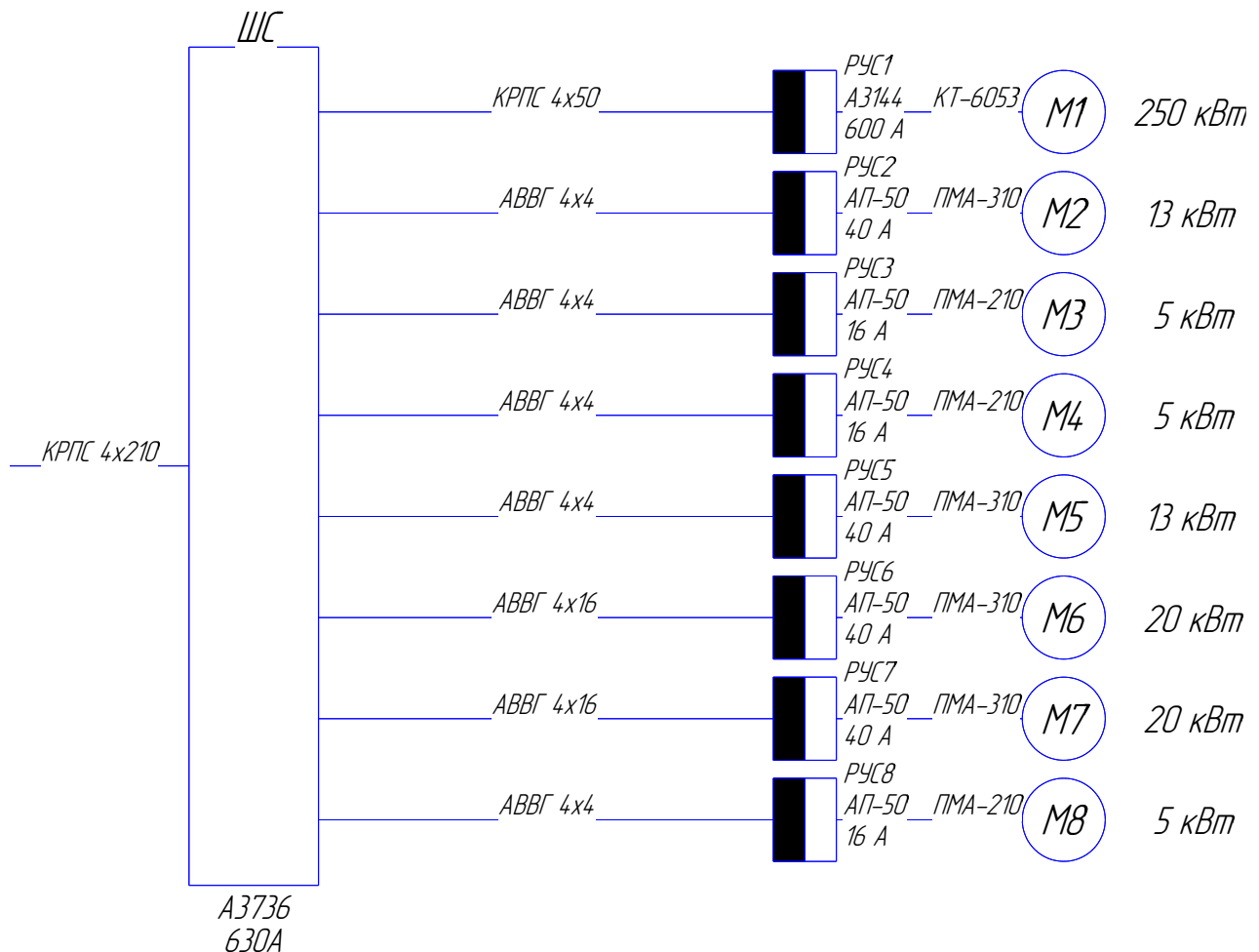


Рисунок 2.1 – Схема принципова проектованої мережі

Допустима активна складова напруги:

$$\Delta U_{a\partial} = \Delta U_{\partial} - \Delta U_p, \text{ В} \quad (2.6)$$

$$\Delta U_{a\partial} = 400 - 20 = 380 \text{ В.}$$

Переріз проводу магістралі розрахунковий 10 кВ:

$$F_{розр} = \frac{P \cdot l}{U_{ном} \cdot \Delta U_a \cdot g}, \text{ мм}^2 \quad (2.7)$$

де: $g=32 \cdot 10^{-6}$ См/м – провідність алюмінію питома.

$$F_{розр} = \frac{331 \cdot 1000}{10000 \cdot 380 \cdot 32 \cdot 10^{-6}} = 3,0 \text{ мм}^2$$

Відповідно до ПУЕ, мінімальний переріз сталеву-алюмінієвого проводу марки АС для лінії напругою 10 кВ складає 25 мм². Таким чином, для лінії 10 кВ обираємо провід марки АС-25 згідно з табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Характеристика провідників електричної мережі 10 кВ

Лінія мережі 10 кВ	Марка про- воду	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	Допустимий струм, А
ТП 35 кВ - ТП 10 кВ	АС-25	1,146	0,377	136

$$\Delta U = \sqrt{3}(r_0 \cdot \cos \phi + x_0 \cdot \sin \phi) \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i, \text{ В} \quad (2.8)$$

де: n – кількість секцій мережі; r_0 , x_0 – питомі значення активного та реактивного опорів лінії живлення; ΔU_a , ΔU_p – активна та реактивна втрата напруги; I_i , l_i – значення струму та довжина i-ї секції мережі.

$$\Delta U = \sqrt{3}(1,146 \cdot 0,92 + 0,377 \cdot 0,39) \frac{517,8}{25} \cdot 4,0 = 100 \text{ В (1,0 \%)}$$

Втрата напруги в обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при максимальному навантаженні:

$$\Delta U = \frac{I_H}{k_{mp}} \cdot Z_m = \frac{517,8}{25} \cdot 9,0 = 187 \text{ В (1,9\%)}$$

Розрахунок мережі 0,38 кВ

Реактивна складова втрати напруги у магістралі 0-1:

$$\Delta U_p = \frac{x_0}{U_{ном}} (Q \cdot l), \text{ В} \quad (2.9)$$

$$\Delta U_p = \frac{0,35}{0,38} (143,8 \cdot 0,3) = 39,6 \text{ В}$$

У зв'язку зі значним реактивним навантаженням та великими втратами напруги в лінії, вводимо додаткове коригування +7,5. Допустиме значення активної складової напруги можна визначити за формулою:

$$\Delta U_{a\partial 0-1} = \Delta U_{\partial} - \Delta U_p = 47,5 - 39,6 = 8,3 \text{ В}$$

Розрахунковий переріз проводів магістралі 0-1 визначаємо за формулою:

$$F_{0-1\text{розр}} = \frac{P \cdot l}{U_{ном} \cdot \Delta U_{a\partial 0-1} \cdot g}, \text{ мм}^2 \quad (2.10)$$

$$F_{0-1\text{розр}} = \frac{331 \cdot 0,3}{0,4 \cdot 8,3 \cdot 32 \cdot 10^6} = 200 \text{ мм}^2$$

$$\Delta U = \sqrt{3}(0,24 \cdot 0,92 + 0,128 \cdot 0,39) \cdot 517,8 \cdot 0,3 = 41,9 \text{ В}$$

Результати розрахунку показано у табл.2.9.

Таблиця 2.9 – Значення втрати напруги в магістралі і поперечний перерізів проводів.

Магістраль	U _p , В	U _{ад} , В	Фрозр. , мм ²
0-1	39,6	8,3	200

Зі списку стандартних марок проводів обираємо відповідний номінальний переріз проводу електричної мережі напругою 0,38 кВ згідно з таблицею 2.10.

Таблиця 2.10 – Характеристика проводу електричних мереж ліній 0,38 кВ

Лінія мережі 0,38 кВ	Марка про- воду	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км	Допустимий струм, А
1	КРПС 4×210	0,24	0,128	850

Таблиця 2.11 – Дійсний спад напруги у магістралі.

Магістраль	0-1
ΔU, В	41,9

За характеристиками обраних проводів визначаємо фактичну втрату напруги в лінії електромережі з напругою 0,38 кВ за формулою (2.10). Результати розрахунку наведено в таблиці 2.11.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КАР'ЄРУ

3.1 Математична модель синхронної машини

Математичне моделювання синхронної машини є необхідним інструментом для дослідження перехідних процесів, аналізу стійкості енергосистем та синтезу систем автоматичного керування збудженням. Головна складність опису процесів у синхронній машині в «природних» фазних координатах статора (А, В, С) полягає в тому, що взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора періодично змінюються в часі залежно від кута повороту ротора. Це призводить до системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, які вкрай важко розв'язувати. Для подолання цієї проблеми в сучасній електротехніці загальноприйнятим є використання перетворення Парка-Горєва. Суть методу полягає в математичному перенесенні змінних зі статора на ротор: трифазна нерухома система координат (А, В, С) замінюється на двофазну ортогональну систему координат (d, q), яка жорстко пов'язана з ротором і обертається разом з ним із синхронною швидкістю.

У цій обертовій системі вісь d (direct axis — поздовжня вісь) традиційно суміщається з віссю магнітного полюса ротора (обмоткою збудження), а вісь q (quadrature axis — поперечна вісь) випереджає її на 90 електричних градусів, проходячи через міжполюсний простір. Завдяки такому перетворенню, для спостерігача, що «сидить на роторі», магнітні поля та струми в усталеному режимі стають незмінними величинами (постійним струмом), а індуктивні опори — константами (L_d та L_q). Це дозволяє перейти від складної системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами до значно простішої системи з постійними коефіцієнтами.

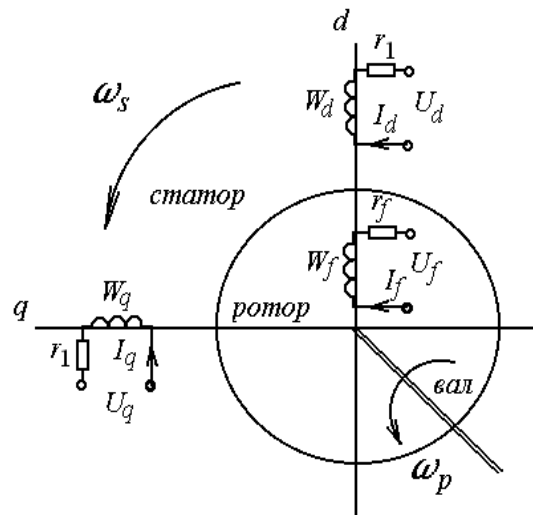


Рисунок 3.1 — Електромагнітна модель синхронної машини в системі координат d-q

Система рівнянь електричної рівноваги для кіл статора в координатах d-q записується з урахуванням двох складових електрорушійної сили: трансформаторної (викликані зміною струму в часі) та обертальної (викликані обертанням ротора). Рівняння напруги мають вигляд:

$$u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q$$

$$u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega\psi_d$$

де u_d, u_q, i_d, i_q — проекції векторів напруги та струму на відповідні осі; R — активний опір обмотки статора; ψ_d, ψ_q — потокозчеплення по осях; ω — електрична кутова швидкість ротора. Доданки $\frac{d\psi}{dt}$ відображають трансформаторну ЕРС, яка виникає лише в перехідних процесах, тоді як доданки $\omega\psi$ являють собою ЕРС обертання, що існують і в усталеному режимі.

Рівняння потокозчеплень зв'язують магнітні потоки зі струмами через індуктивності машини. Оскільки по осі d діє обмотка збудження, а також демпферні контури, рівняння для цієї осі є складнішим. У спрощеному вигляді, нехтуючи демпферними контурами для наочності, маємо:

$$\psi_d = L_d i_d + M_{af} i_f$$

$$\psi_q = L_q i_q$$

де L_d, L_q — синхронні індуктивності по поздовжній та поперечній осях ($L_d > L_q$ для явнополюсних машин), i_f — струм збудження, приведений до статора, а M_{af} — взаємна індуктивність між статором і ротором. Для повноти моделі сюди додається рівняння кола збудження ротора:

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}$$

Завершує математичну модель рівняння механічного руху ротора, яке описує баланс моментів на валу. Воно базується на другому законі Ньютона для обертального руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_{mech} - M_{damp}$$

де J — момент інерції агрегату, M_{mech} — механічний момент опору (для двигуна) або рушійний момент турбіни (для генератора), а M_{em} — електромагнітний момент машини. У координатах d-q вираз для електромагнітного моменту набуває зручного для аналізу вигляду:

$$M_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

Ця система рівнянь є універсальною: вона описує як статичні режими (коли похідні за часом дорівнюють нулю), так і динамічні перехідні процеси (пуску, короткого замикання, хитання ротора), дозволяючи точно розраховувати параметри компенсації реактивної потужності в будь-який момент часу.

3.2 Моделювання системи електропостачання

Модель системи електропостачання будуємо у математичній програмі MATLAB/Simulink рисунок 3.2. Схема складається із джерела живлення 10 кВ, лінії живлення 10 кВ, трансформаторної підстанції 630 кВА 10/0,4 кВ, лінія живлення 0,4 кВ навантаження, для імітації компенсації реактивної потужності блок конденсаторів. У схемі ми будемо вимірювати коефіцієнти потужності, струми, спад напруги у лініях, напруги у колах 10 кВ та 0,4 кВ.

Для внесення параметрів мережі перераховуємо її параметри згідно довжин лінії таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри ліній електропостачання для моделювання

Марка про- воду	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	l , км	$r_{\text{л}}$, Ом	$x_{\text{л}}$, Ом	L , Гн
АС-25	1,146	0,377	4	4,584	1,105	0,0048
КРПС 4×210	0,24	0,128	0,3	0,072	0,0384	0,0001

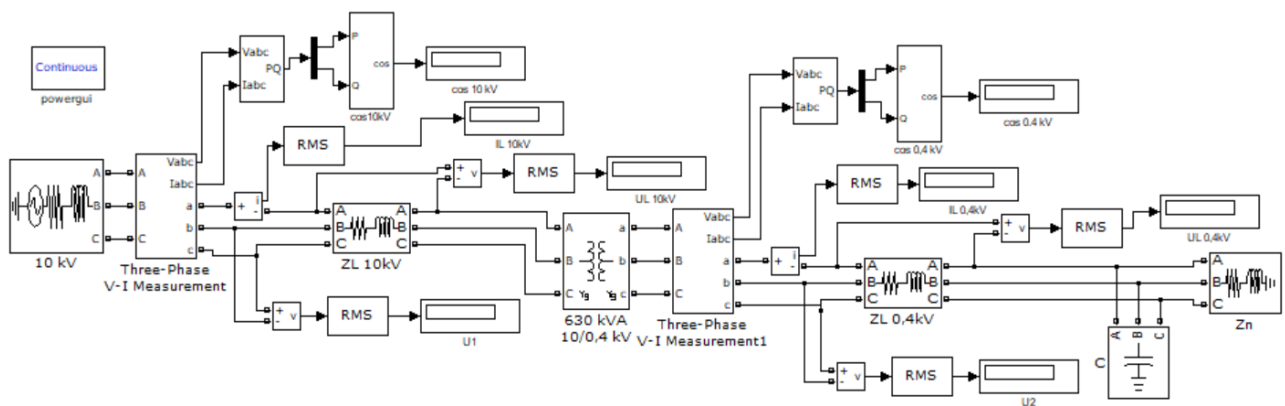


Рисунок 3.2 – Модель системи електропостачання кар'єру побудована в середовищі MATLAB/Simulink

Перший дослід ми проводимо із імітацією роботи мережі із асинхронним двигуном. Компенсація реактивної потужності у схемі в даному випадку здійснюється за допомогою конденсаторних батарей. Потужність пристрою компенсації змінюємо у межах від 0 до 500 кВАр із кроком 20 кВАр. Результати дослідження показано у таблиці 3.2. Згідно цього дослідження ми бачимо що компенсація працює і при потужності конденсаторної установки 120 кВАр коефіцієнт потужності у колі 0,4 кВ стає більше 0,9, а при 140 кВАр і у колі 10 кВ також коефіцієнт потужності досягає рівня 0,9. подальше збільшення потужності конденсаторів призводить до збільшення коефіцієнта потужності аж до 1. І у колі 0,4 кВ у межах від 260 кВАр до 340 кВАр коефіцієнт тримається на рівні 1. У колі 10 кВ коефіцієнт потужності становить 1 у діапазоні зміни потужності конденсаторів 300 – 380 кВАр.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані першого експерименту

Q, кВАр	IL10кВ, А	UL 10кВ, В	cosφ 10кВ	IL0,4кВ, А	UL 0,4кВ, В	cosφ 0,4кВ
0	22,5	109,3	0,76	517,4	40,5	0,80
20	22,0	106,0	0,78	505	39,7	0,81
40	21,5	103,8	0,80	494,1	38,8	0,83
60	21,1	101,6	0,82	484,1	38,0	0,86
80	20,6	100,0	0,84	474,3	37,2	0,87
100	20,2	98,4	0,86	465,5	36,6	0,89
120	19,9	97,4	0,88	457,5	35,9	0,91
140	19,6	97,1	0,90	449,8	35,3	0,93
160	19,4	94,7	0,92	445,0	34,9	0,94
180	19,1	94,2	0,93	439,6	34,5	0,96
200	19,0	92,2	0,95	437,2	34,3	0,97
220	18,9	92,2	0,96	435,8	34,2	0,98
240	18,9	92,5	0,98	435,0	34,1	0,99
260	19,0	92,5	0,99	436,1	34,2	1,00
280	19,0	94,0	0,99	438,3	34,4	1,00
300	19,2	95,0	1,00	442,3	34,7	1,00
320	19,5	96,1	1,00	448,3	35,2	1,00
340	19,8	97,7	1,00	455,7	35,7	1,00
360	20,2	99,6	1,00	464,7	36,5	0,99
380	20,6	101,9	1,00	475,3	37,3	0,98
400	21,1	104,3	0,99	487,2	38,2	0,96
420	21,7	107,1	0,98	500,7	39,3	0,96
440	22,4	110,3	0,97	515,7	40,5	0,94
460	23,1	113,6	0,96	531,9	41,7	0,93
480	23,8	116,7	0,95	549,8	43,1	0,92
500	24,6	121,2	0,94	568,1	44,6	0,90
520	25,5	125,3	0,93	588,0	46,2	0,89
540	26,4	129,7	0,92	608,9	47,8	0,87

При зміні потужності пристрою компенсації ми бачимо зміну величини струму у лініях, а також спадів напруги у лініях. Збільшення потужності конденсаторної установки призводить спочатку до зменшення струмів у лініях та спадів напруг до певної межі. Подальше збільшення потужності батарей призводить до перекомпенсації, що видно із зростання струмів та спаду напруг у лініях.

Другий дослід ми провели для роботи схеми із використанням синхронного двигуна. У цьому випадку менше споживання реактивної потужності. Результати дослідження показано у таблиці 3.2. Дослід проводимо для випадку коли здійснюється імітація зміни збудження синхронного двигуна, а саме компенсація до 40% від потужності двигуна. Для цього здійснювали зміну потужності конденсаторних батарей у межах від 0 до 100кВАр.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані другого експерименту

Q, кВАр	IL10кВ, А	UL 10кВ, В	cosφ 10кВ	IL0,4кВ, А	UL 0,4кВ, В	cosφ 0,4кВ
0	19,8	96,8	0,88	454,2	35,6	0,92
20	19,5	94,0	0,91	448,1	35,2	0,93
40	19,3	93,1	0,92	443,1	34,8	0,95
60	19,1	93,4	0,94	438,9	34,5	0,96
80	19,0	92,0	0,96	436,2	34,0	0,97
100	18,9	92,2	0,97	434,6	34,2	0,97

Згідно проведених досліджень ми побачили, що додаткова компенсація дає покращення технологічних показників. Підвищення коефіцієнтів потужності, зменшення струмів та спадів напруг у лініях. Хоча робота синхронної машини без перезбудження, забезпечує належне значення потужності у колі 0,4 кВ, а саме 0,92, у колі 10 кВ 0,88. Невелике перезбудження порядку 20 кВАр, забезпечує коефіцієнт потужності у двох лініях 10 та 0,4 кВ більше 0,9.

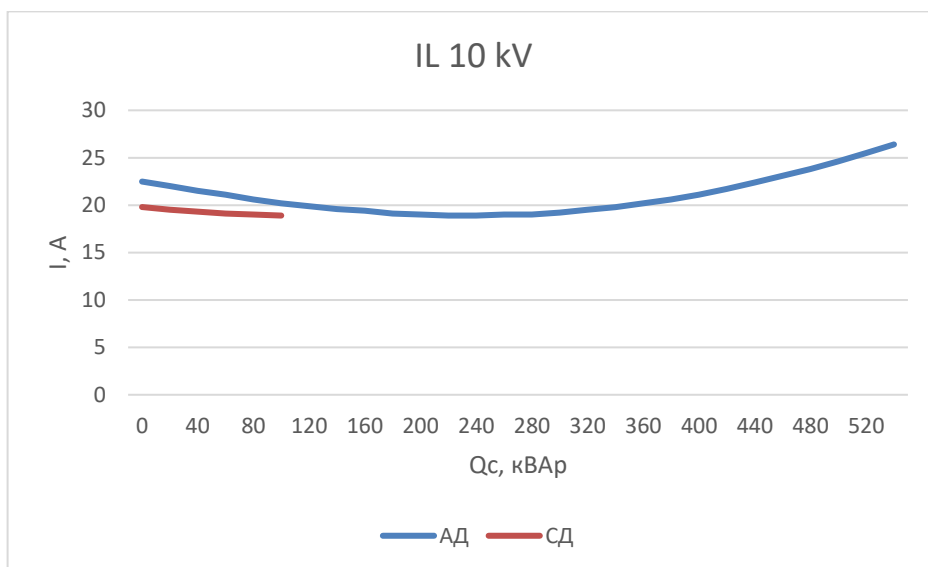


Рисунок 3.3 – Графічна залежність струму у лінії 10 кВ

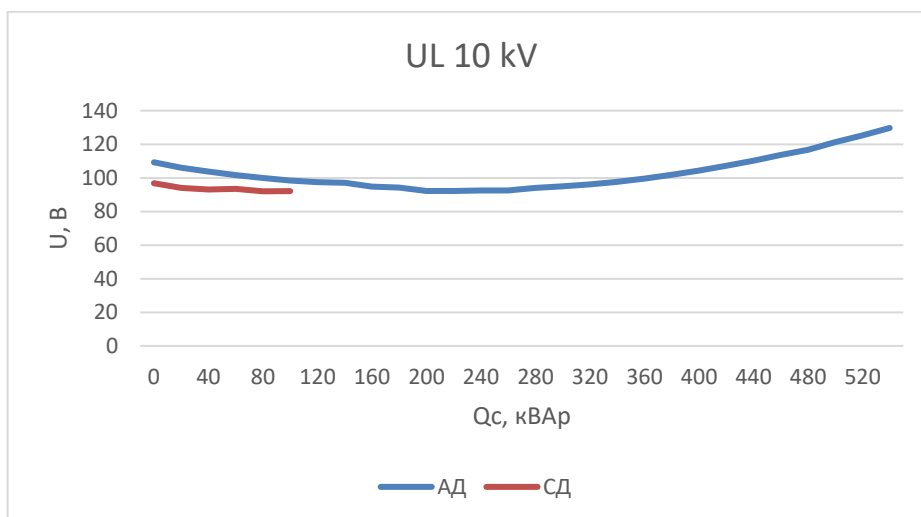


Рисунок 3.4 – Графічна залежність спаду напруги у лінії 10 кВ

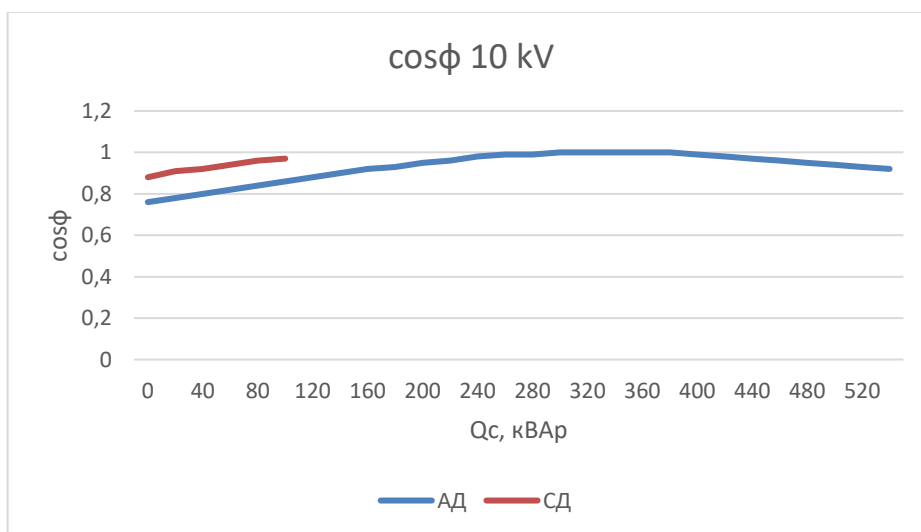


Рисунок 3.5 – Графічна залежність коефіцієнта потужності у лінії 10 кВ

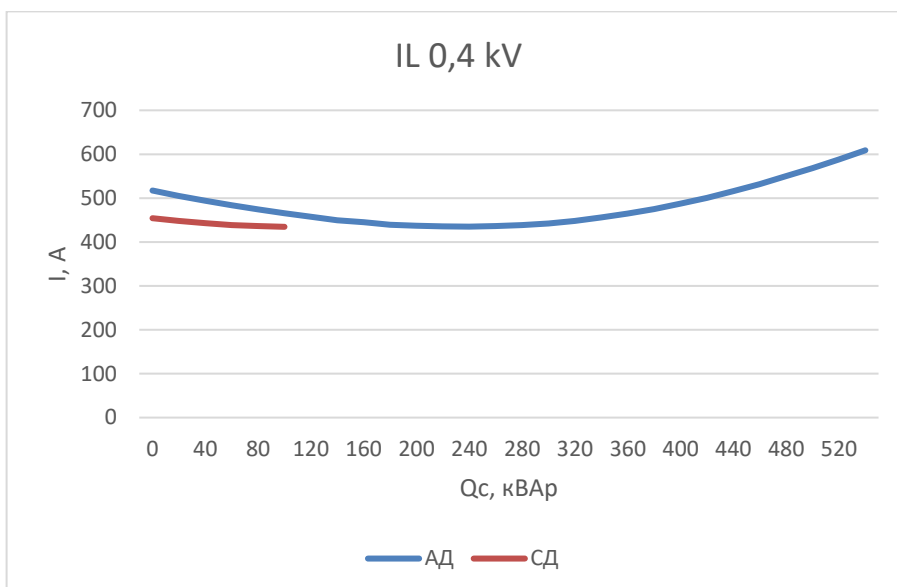


Рисунок 3.6 – Графічна залежність струму у лінії 0,4 кВ

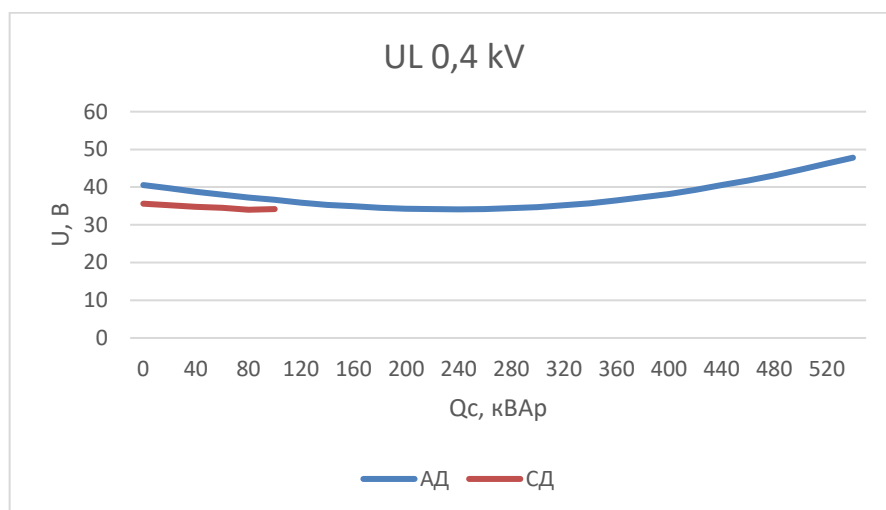


Рисунок 3.7 – Графічна залежність спаду напруги у лінії 0,4 кВ

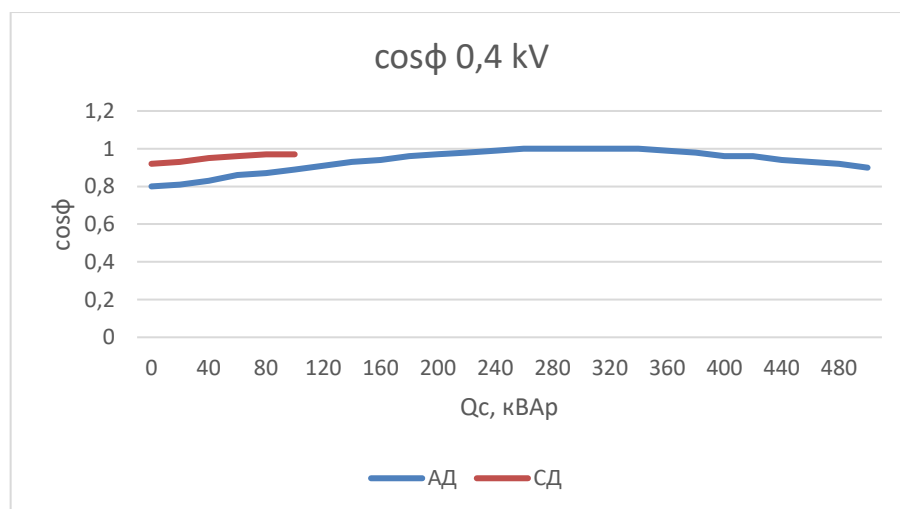


Рисунок 3.8 – Графічна залежність коефіцієнта потужності у лінії 0,4 кВ

Для зручності порівняння отриманих результатів ми побудували порівняльні залежності одноіменних величин двох дослідів на одній координатній площині рисунки 3.3 – 3.8.

Із отриманих графічних залежностей видно ефективність використання синхронного двигуна замість асинхронного. Оскільки усі показники мають кращі значення, навіть без перезбудження.

Для того щоб мережа 0,4 кВ із асинхронним електродвигуном мала коефіцієнт потужності більше 0,9 необхідно пристрій компенсації порядку 120 кВАр. Окрім того необхідно мікропроцесорний регулятор коефіцієнта потужності та комутаційно-захисне обладнання.

Звичайно використання синхронного двигуна передбачає додаткові видатки на збудження синхронного двигуна та обслуговування щіток та контактних кілець.

Проте схема так чи інакше потребує доопрацювання для забезпечення належного значення коефіцієнта потужності.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз забезпечення охорони праці на підприємстві

Охорона праці – це система, яка призначена для зберегання здоров'я і життя кожного працівника в процесі роботи. Дана система включає в себе організаційно – технічні, соціально – економічні, лікувально – профілактичні, а також санітарно гігієнічні норми. Дотримування всіх законів і нормативних прав в галузі охорони праці дозволить забезпечити успішний розвиток підприємства, і забезпечити нормальну його діяльність. Електроустановка це об'єкт підвищеної небезпеки, а отже потрібно дотримуватися відповідних вимог. Нижче представлені основні задачі в області охорони праці при яких ставляться відповідні вимоги, щодо користування електроустановками. Перш за все потрібно зазначити головну ціль політики охорони праці і саме збереження здоров'я і життя робітників підприємства.

Одна з основних задач в процесі трудової діяльності підприємств в яких для технологічних процесів застосовуються багато електроустановок потрібно забезпечити безпечні умови праці, звести до мінімуму ризику виникнення виробничого травматизму, і професійних захворювань. Щоб реалізувати дану задачу потрібно, щоб на кожному підприємстві діяли відповідні служби, які займаються питання в області охорони праці. Завдання цих служб полягає в тому, щоб працівники підприємств дотримувалися всіх норм і правил по охорони праці в процесі трудової діяльності. Кожний працівник повинен знати про міру безпеки на робочому місці, а також дотримуватися правил техніки безпеки.

Служби по охорони праці аналізують діяльність підприємства, знаходять можливі ризики і складають відповідні інструкції і директиви, основна задача яких полягає в забезпеченні максимальної безпеки робітників підприємства в

процесі виконанні певних робіт, а також по можливості звести до мінімуму ризику життя і здоров'я.

Персонал який обслуговує відповідні електроустановки, періодично проходить перевірку знань нормативних документів по охорони праці. Окрім того кожен із робітників проходить спеціальні тренування, ціль яких являється набуття навичок (перевірка навичок), щодо застосування знань нормативних документів по охорони праці на практики. Основний нормативний документ по охорони праці персоналу, який обслуговує електроустановки це правила безпечної експлуатації електроустановок. Основна мета, щодо направлення на підвищення рівня безпеки праці це постійне покращення робочих місць, технологічних процесів і системи управління охороною праці на підприємстві.

В електроустановках дана мета реалізується наступним чином:

- 1) заміна застарілого обладнання;
- 2) використання новітнього сучасного обладнання;
- 3) використання технологій які забезпечують додаткову безпеку робітників під час проведення робіт в електроустановках;
- 4) своєчасне знаходження і усунення неполадок обладнання;
- 5) забезпечення додаткового контролю над дотриманням вимог охорони праці.

4.2 Моделювання процесу виникнення травм під час роботи з електроустановками

Метод логічного моделювання небезпечних ситуацій на підприємстві при яких відбувається аварія, травма чи катастрофа дозволяє оцінити дану ситуацію, а також знайти необхідні вирішення при яких ризик подальших подій таких як аварія, травма чи катастрофа зведеться до мінімуму. При цьому як показали дослідження будь яка катастрофа чи аварія може бути наслідком однієї із багатьох інших небезпечних ситуацій при їх поєднанні. Тому даний метод не може бути застосований при моделювання складних виробничих процесів, які ведуть за собою виникнення великих аварій чи катастроф.

Метод дозволяє за допомогою побудови «древа» помилок вести обробку математичної моделі метою якої є моделювання небезпечних ситуацій при яких можливе виникнення таких випадкових подій як травма. Щоб обчислити даний вид небезпеки потрібно оцінити її рівень, удосконалити конструкції технічний засобів на зведення до мінімуму ризиків небезпеки, а також вжити термінові заходи для усунення небезпек з більш високим рівнем.

Принцип побудови математичної моделі полягає в наступному. Спочатку вивчається підприємство, на якому були певні аварії чи травми, або можуть виникнути в майбутньому. Наприклад до уваги беремо підприємство на якому виконуються багато робіт з електроустановками, найнебезпечнішим явищем тут може бути ураження електричним струмом працівника. Приймаючи подію до уваги «ураження електричним струмом» як головну ми можемо пов'язати з нею і наступні події за допомогою логічної взаємопов'язаної лінії «І», та «АБО» та інших. Приклад застосування даних операторів при нашій події зображений на рис. 4.1.

Для того щоб оцінити можливість виникнення ситуації на підприємстві достатньо скористатися простим і доступним методом, який включає в себе обчислення ймовірності певного явища. Щоб оцінити ситуацію для початку потрібно вибрати головну подію логічної моделі. Це може бути травма, аварія чи катастрофа. Відповідно для нашої ситуації головною подією буде «Ураження електричним струмом».

Після визначення головної події можна приступати до побудови математичної моделі. Відповідно до ГОСТ Р 50571.3 – 94 «Система безпеки охорони праці. Захист від ураження електричним струмом», в якому вказано, що технологічні процеси повинні розроблятися так, щоб ймовірність ураження електричним струмом на підприємстві протягом року не перевищувало 10^{-3} або 0,001. Отже $P=0,001$. де P – певна базова подія на підприємстві.

Для того щоб провести логічність виникнення травм при ураженні електричним струмом, використаємо математичну імітаційну модель. Процес її формування зображено на рис. 4.2.

Ймовірність виникнення події 3:

$$P_3 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \quad (4.1)$$

Приймаємо, що умовна ймовірність базових першої та другої події буде рівною $P_1 = 0,5$, а $P_2 = 0,4$. Підставивши дані значення в формулу 4.1, ми отримаємо:

$$P_3 = 0,5 + 0,4 - 0,5 \cdot 0,4 = 0,7$$

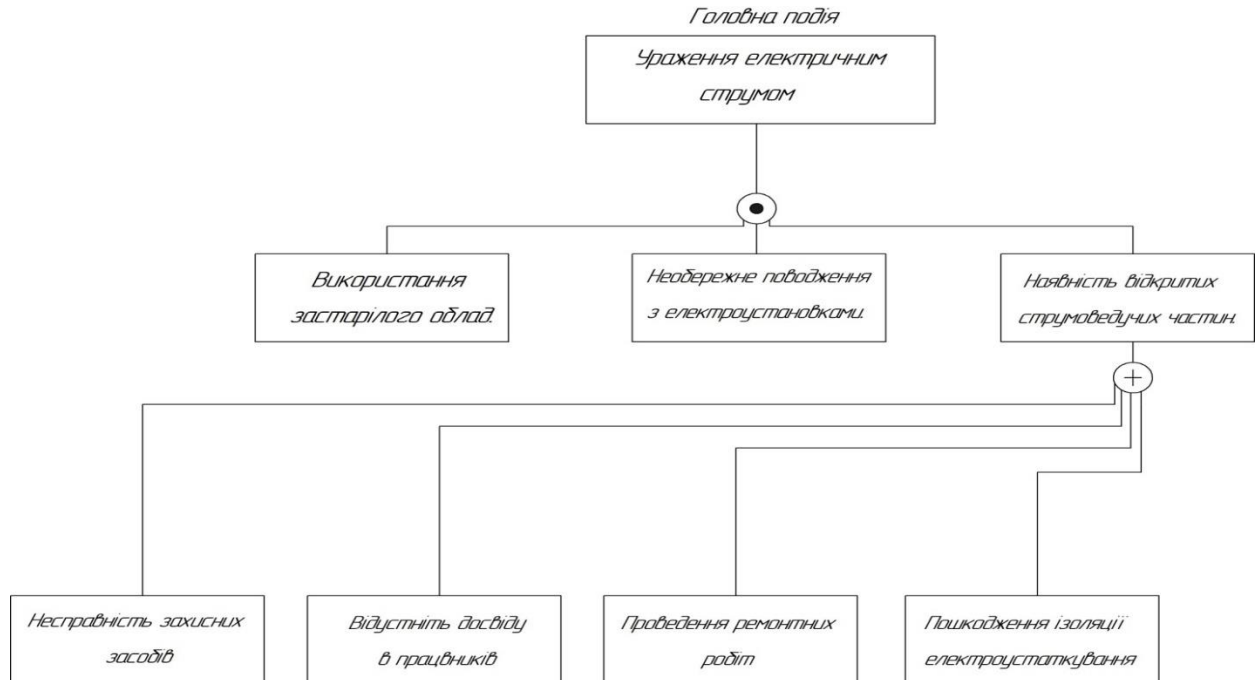


Рисунок 4.1 – Застосування логічних операторів до змодельованої ситуації «Ураження електричним струмом»

Аналогічно обраховуємо ймовірність наступних подій, в залежності від їх номеру:

$$P_6 = P_4 + P_5 - P_4 \cdot P_5 = 0,72;$$

$$P_9 = P_7 + P_8 - P_7 \cdot P_8 = 0,72;$$

$$P_{10} = P_3 + P_6 + P_9 - P_3 \cdot P_6 - P_3 \cdot P_9 - P_6 \cdot P_9 + P_3 \cdot P_6 \cdot P_9 = 0,27;$$

$$P_{13} = P_{11} + P_{12} - P_{11} \cdot P_{12} = 0,72;$$

$$P_{16} = P_{14} + P_{15} - P_{14} \cdot P_{15} = 0,72;$$

$$P_{19} = P_{17} + P_{18} - P_{17} \cdot P_{18} = 0,72;$$

$$P_{20} = P_{13} + P_{16} + P_{19} - P_{13} \cdot P_{16} - P_{13} \cdot P_{19} - P_{16} \cdot P_{19} + P_{13} \cdot P_{16} \cdot P_{19} = 0,98.$$

Таким чином ураження електричним струмом на підприємствах при виконанні технологічних процесів на електроустаткуванні на 100 місць варто очікувати 5 – 6 уражень електричним струмом. Якщо вище зазначені недоліки негайно усунути (підвищити професійний рівень працівників, використання сучасного

електроустаткування, перевірка обладнання при технічному огляді а також своєчасне виявлення неполадок), то можна побачити що при повторному пере-рахунки рівень небезпеки буде близьким до 0, а рівень безпеки до 1.

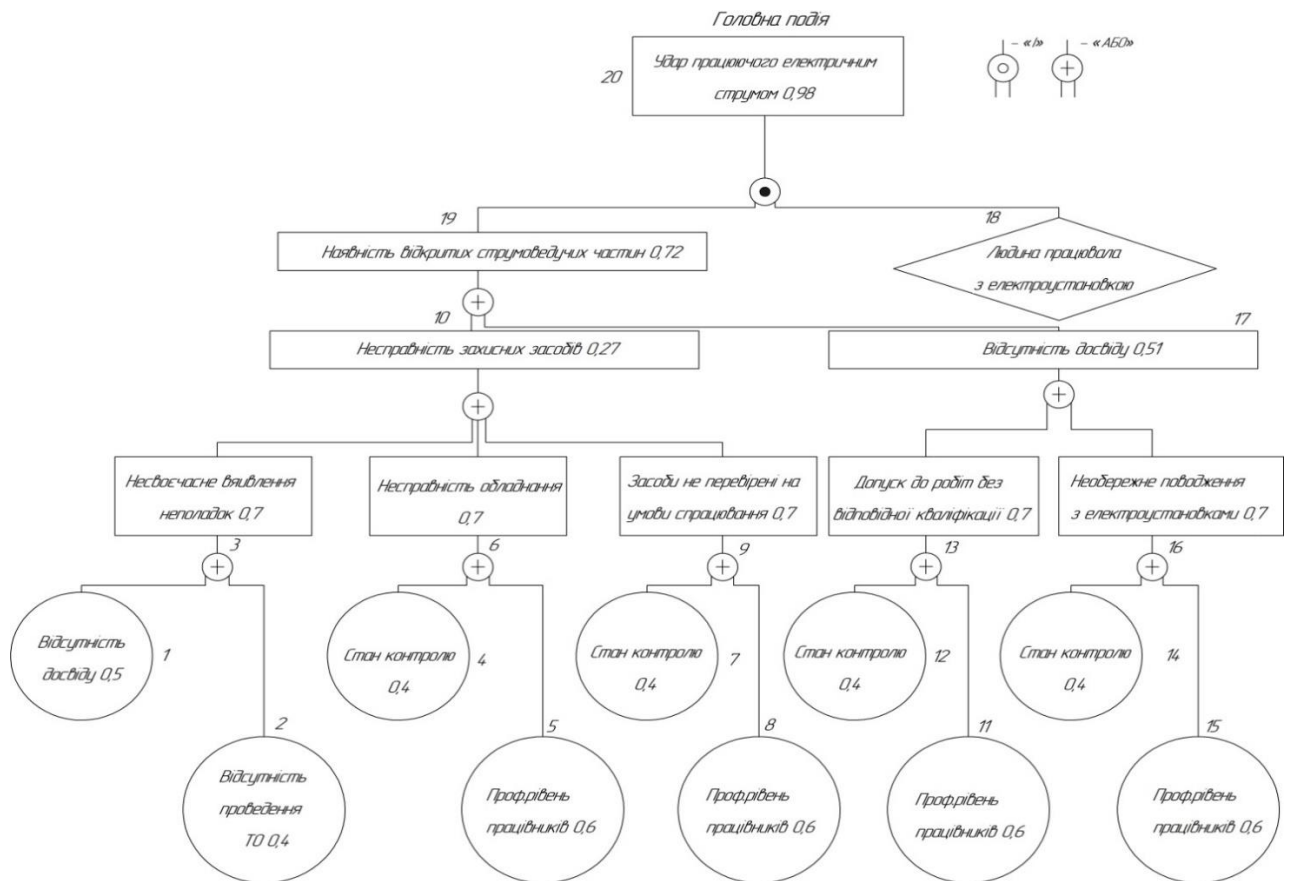


Рисунок 4.2 – Логічно – імітаційна модель при ударі електричним струмом:

1, 2, 3 – номери подій; 0,4, 0,6 – ймовірність виникнення подій

Логіко – імітаційні моделі аварій і травм на виробництві допомагають зменшити ймовірність виникнення травмонебезпечних ситуацій, тому дане застосування даних моделей дуже важливе при оцінці небезпеки робочого місця.

4.3 Заходи безпеки під час надзвичайних ситуацій

Адміністрація підприємства повинна відповідально відноситися до надзвичайних ситуацій. При виникненні небезпеки головною метою є захист населення та правильної організації його життєзабезпечення.

Заходи до яких відносяться захист цивільного населення повинні проводитися в населених пунктах, там де розміщені підприємства чи сільськогосподарські установи і охоплюють навколишні села. Характер та ступінь змісту захисних засобів встановлюється відповідно до рівня загрози, місцевих умов з урахуванням важливості виробництва для безпеки населення і інших соціальних і економічних чинників.

Основні заходи щодо захисту населення плануються та здійснюються завчасно і мають випереджувальний характер, це стосується насамперед підготовки, підтримання у постійній готовності індивідуальних та колективних засобів захисту, їх накопичення, а також підготовки до проведення евакуації населення із зон підвищеної небезпеки.

Головні особи підприємства є безпосередніми виконавцями цих заходів, вони повинні розробляти їх завчасно, проводити навчання робітників та службовців способам захисту та діям в умовах надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 5

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

Маємо провести економічну оцінку запропонованих технічних рішень. Капітальні витрати з використанням гідронамиву споживає за рік $W = 1\,029\,411$ кВт·год. Вартість однієї кВт·год становить $C = 4,32$ грн. Відповідно, загальні витрати на електроенергію складатимуть:

$$B = W \times C. \quad (5.1)$$

$$B = 1029411 \times 4,32 = 4\,447\,056 \text{ грн.}$$

У разі низького коефіцієнта потужності, близько 0,8, передбачено додатковий нарахунок при оплаті електроенергії у розмірі 7%, що дорівнює

$$H = 4447056 \times 0,07 = 311\,294 \text{ грн.}$$

За відсутності необхідності у виплаті надбавки, за умови відповідного значення коефіцієнта потужності, ці кошти залишаються на рахунку підприємства.

Орієнтовна вартість запропонованої системи керування:

- система регулювання збудження синхронного генератора — близько 120 000 грн;
- синхронний двигун — приблизно 416 000 грн.

Таким чином, загальна вартість встановленого обладнання складає:

$$K = 416\,000 + 120\,000 = 536\,000 \text{ грн.}$$

Час окупності визначається як співвідношення капітальних вкладень до отриманих заощаджень коштів.

$$T = \frac{K}{H}, \quad (6.2)$$

$$T = \frac{536000}{311294} = 1,7 \text{ року.}$$

Пораховані значення показано у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Техніко-економічні показники

Показник	Значення
Кількість спожитої електроенергії, кВт·год/рік	1029411
Вартість 1 кВт·год, грн.	4,32
Вартість спожитої електроенергії в рік, грн.	4 447 056
Значення коефіцієнта потужності, до компенсації	0,8
Надбавка, при платі за електроенергію без компенсації, %	7
грн.	311 294
Вартість системи регулювання збудження двигуна, грн.	536 000
Значення коефіцієнта потужності, після компенсації	0,92
Надбавка, при платі за електроенергію з компенсацією, %	0
грн	0
Термін окупності, років	1,7

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі проаналізовано питання будови, особливостей та режимів роботи синхронної машини, як пристрою компенсації реактивної потужності. Запропоновано для землеснаряда замість асинхронної машини використати синхронний двигун із регулюванням збудження.
2. Проведено розрахунок мережі електропостачання кар'єру з землеснарядом, та вибрано трансформаторну підстанцію КТП-630-10/0,4 кВ та марки проводів живлення мереж 10 та 0,4 кВ.
3. Проаналізовано питання побудови моделі синхронного двигуна. Побудовано модель системи електропостачання у математичному середовищі MATLAB/Simulink. Проведено порівняльне дослідження з імітацією роботи мережі із асинхронним та синхронним електродвигуном. Робота мережі із асинхронним двигуном, обов'язково потребує додаткового пристрою компенсації реактивної потужності навантаження. При роботі із синхронним двигуном техніко-економічні показники мережі є кращими. Достатньо незначного перезбудження синхронного двигуна для забезпечення належного значення коефіцієнта потужності у мережах 10 та 0,4 кВ.
4. У кваліфікаційній роботі проаналізовано питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях, а саме визначено ймовірність виникнення травм та розроблено заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.
5. Проведено попередній економічний аналіз ефективності прийнятих рішень, який показав, що основний результат досягається за рахунок забезпечення належного рівня коефіцієнта потужності, а саме 0,92 і вище. Це обумовлено тим, що при низькому рівні коефіцієнта потужності доводиться сплачувати додаткову надбавку за електроенергію, тоді як при дотриманні необхідного рівня ці витрати можна уникнути. Згідно з проведеним узагальненим розрахунком, термін окупності складає 1,7 року.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Видмиш А. А., Трошин О. А. Теорія електропривода. Лабораторний практикум: навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2003. 135 с.
2. Дурняк Б. В., Чумакевич В. О., Лях І. М., Яцун А. М. Основи електропостачання агропромислового комплексу: навчальний посібник. Львів: Українська академія друкарства, 2017 р. 544 с.
3. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник. Є.Л. Жулай та ін. Київ: Вища освіта, 2001 р. 288с.
4. Жилдецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. Львів: Афіша. 2005.
5. Колб А. А. Теорія електроприводу. Навчальний посібник. Донецьк: Національний гірничий університет, 2006. 511 с.
6. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001 р.
7. Маліновський А. А., Хохулін Б. К. Основи електроенергетики та електропостачання: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2009 р. 436 с.
8. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2001 р. 596 с.
9. Матвійчук В. А., Стаднік М. І., Рубаненко О. О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. Вінниця: ВНАУ, 2016. 320 с.
10. Мірошник О. В., Трунова І. М. Організація технічної експлуатації енергетичного устаткування підприємств АПК. Харків: ПП ЧЕРВЯК, 2005 р. 128 с.
11. Основи електроенергетики та електропостачання. А. А. Маліновський, Б. К. Хохулін. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007. 380 с.
12. Основи охорони праці. Купник М. П. і ін. Київ: Основа, 2000 р. 41с.

13. Паначевський Б. І. Загальна електротехніка. Київ: Каравела, 2004 р. 440 с.
14. Правила улаштування електроустановок. Харків: Форт, 2009 р. 736 с.
15. «Правила техніки безпеки при електромонтажних і налагоджувальних роботах». Київ 2006. 190 с.
16. «Правила технічної експлуатації магістральних і внутрішньо зоно-вих мереж». Міністерство палива та енергетики. Київ 2007. 230 с.
17. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: ДНАОП 0.00 – 1.21 – 98. Офіц.вид. Київ: Держбуд України, 2001 р. 24 с.
18. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. ДБН В.2.5-23-2003. Державний комітет України з будівництва та архітектури. Київ. 2004.
19. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. ДНАОП 0.00-1.32-01. Київ 2001.
20. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для ву-зів. Вид. 2-е, доправ. та доп. Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен Дніпропетровськ. Національний гірничий університет. 2002. 597 с.
21. Сегеда М. І. Теоретичні основи електротехніки: навчальний посіб-ник. Тернопіль, ТДУ, 2003 р. 350 с.
22. Титаренко М. В. Електротехніка: навч. посіб. для студентів інжене-рно-технічних (не електротехнічних) спеціальностей вузів. Київ: Кондор, 2015 р. 240 с.
23. Черемісін М. М., Зубко В. М. Автоматизація обліку та управління електроспоживанням: навч. посіб. Харків: Факт, 2005 р. 168 с.
24. Шевчук В., Пилипчук М., Карпенко Н., та ін. Довідник з питань еко-номіки та фінансування природокористування і природоохоронної діяльності. Видавництво «Геопринт». Київ, 2000. 412с.
25. Шелепетень Т. М. Захисна автоматика електричних мереж. Львів. Видавництво «Дичандр», 2002. 157с.