

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У
ВУЗЛІ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З СИНХРОННИМИ
ПРИВОДАМИ»**

Виконав: студент VI курсу

групи Ен – 61 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Сербан С. Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: Чабан А. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Коробка С. В.

(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2024

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

Сербан Святослав Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження компенсації реактивної потужності у вузлі електричного навантаження з синхронними приводами»

(назва теми)

керівник роботи д.т.н., професор Чабан А. В.

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

затверджені наказом Львівського НУП № 616 / к - с від 12.09.2024 р.

2. Строк подання студентом роботи 6.12.2024р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

1. Загальні поняття компенсації реактивної потужності

2. Математичні моделі елементів вузла електричного навантаження

3. Математичні моделі вузлів електричного навантаження

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Економічна частина

Висновки

Перелік джерел посилання

Додатки

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	
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Розкриття питання компенсації реактивної потужності. Обґрунтування понять активної, реактивної та повної потужності.</i>	<i>12.09.2024 – 30.09.2024</i>	
2	<i>Огляд будови та математичних моделей кожного елемента у вузлі електричного навантаження</i>	<i>1.10.2024 – 11.10.2024</i>	
3	<i>Розробка математичних моделей вузлів електричного навантаження з асинхронними та синхронними приводами для компенсації реактивної потужності.</i>	<i>14.10.2024 – 25.10.2024</i>	
4	<i>Аналіз небезпечних і шкідливих чинників, обґрунтування виникнення травмо-небезпечних ситуацій у електроенергетиці</i>	<i>28.10.2024 – 8.11.2024</i>	
5	<i>Здійснення розрахунків з питання економічної окупності конденсаторної батареї марки ЛПС-ДВ</i>	<i>11.11.2024 – 22.11.2024</i>	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	<i>25.11.2024 – 29.11.2024</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>2.12.2024 – 6.12.2024</i>	

Студент _____ Сербан С. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Чабан А. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.316.728; 621.316.729

Сербан С. Р. Дослідження компенсації реактивної потужності у вузлі електричного навантаження з синхронними приводами. Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 58 с. текстової частини, 0 таблиць, 35 рисунків, 19 джерел.

У даній кваліфікаційній роботі представляється компенсація реактивної потужності у вузлі електричного навантаження з синхронними приводами у протизагаду до компенсації реактивної потужності з асинхронними приводами, для яких використовуються компенсаційні пристрої. Розглянуті поняття активної, реактивної та повної потужності, а також розглянуто і саме розуміння компенсації реактивної потужності вузлів електричного навантаження. Представлені теоретичні відомості та математичні моделі кожного елемента, з яких складаються синхронні та асинхронні вузли електричного навантаження. Розроблені три математичні моделі для компенсації реактивної потужності: вузол електричного навантаження з асинхронними приводами без конденсаторної батареї; вузол електричного навантаження з асинхронними приводами з конденсаторною батареєю; вузол електричного навантаження з синхронними приводами, до кожної з моделей розроблені комп'ютерні симуляції, які зображають зміни параметрів під час компенсації реактивної потужності. Розкриті питання небезпечних чинників, які можуть вплинути на безпеку та здоров'я працюючого персоналу. Проведено економічний аналіз вартостей синхронних та асинхронних приводів, а також знайдено термін окупності конденсаторної батареї для вузла електричного навантаження з асинхронними двигунами.

ТРАНСФОРМАТОР, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, КОНДЕНСАТОРНА БАТАРЕЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	10
1.1 Повна, активна та реактивна потужності.....	10
1.2 Компенсація реактивної потужності у вузлах електричного навантаження.....	13
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	16
2.1 Трансформатори.....	16
2.1.1 Конструкція та засади праці елемента.....	16
2.1.2 Математична модель трансформатора.....	24
2.2 Асинхронні машини.....	25
2.2.1 Конструкція та засади праці елемента.....	25
2.2.2 Математична модель асинхронної машини.....	30
2.3 Синхронні машини.....	31
2.3.1 Конструкція та засади праці елемента.....	31
2.3.2 Математична модель асинхронної машини.....	38
2.4 Компенсаційна конденсаторна батарея.....	39
2.4.1 Конструкція та засади праці елемента.....	39
2.4.2 Математична модель компенсаційної батареї.....	42
3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	43
3.1 Вузол електричного навантаження з асинхронними приводами без конденсаторної батареї.....	43
3.2 Вузол електричного навантаження з асинхронними приводами з конденсаторною батареєю.....	47

3.3. Вузол електричного навантаження з синхронними приводами.....	52
3.4. Порівняльний аналіз роботи різних типів вузлів електричного навантаження з точки зору компенсації реактивної потужності.....	55
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..	58
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників у електроенергетиці.....	58
4.2 Обґрунтування процесів формування травмонебезпечних ситуацій	60
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	62
5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	65
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	69
ДОДАТКИ.....	71

ВСТУП

З кожним роком населення країн світу зростає, що призводить до збільшення використання електроенергії. Це призводить до знаходження нових джерел енергії та розробки як старих, так і новіших моделей передачі та трансформації електроенергії для постачання її в кожний населений пункт або селище. Для цього всього незмінним є використання таких електричних апаратів як асинхронних або синхронних електроприводи, трансформаторів, генераторів та багато інших важливих елементів електричного вузла навантаження. Але для даних апаратів і елементів важливим від'ємним чинником є реактивна потужність, яка виникає в той самий момент, коли ми отримуємо електроенергію і нікуди не зникає аж до кінцевого споживача.

Реактивна потужність має певні не бажані для електроенергетики чинники:

- на відмінну від активної потужності реактивна не може виконувати корисної роботи, але натомість тільки збільшує навантаження, яке йде в мережу та на устаткування підстанцій;

- в кожних провідів, через які постачається електроенергія мають свій допустимий максимум щодо нагрівання, а реактивна потужність в свою чергу підвищує струми в них, що призводить до втрат на нагрівання, а ці втрати до збільшення температури, яка може призвести до погіршення ізоляції та виведення провідів з ладу;

- у випадку коли відбувається зростання споживання реактивної потужності, це може призвести до зменшення активної потужності, яку ми безпосередньо передаємо лініями електропередач;

- при надлишку реактивної потужності якість електроенергії достатньо відчутно падає, це відображається підвищенням напруги або частоти за допустимі норм, які допускаються в мережу (5% для житлових масивів і 10% в промислових масштабах).

Для запобігання таких проблем використовують конденсаторні батареї у випадку з асинхронними проводами або саме використання синхронних приводів через їх можливість компенсації реактивної потужності самостійно.

Таким чином **метою роботи** є розробка та побудова математичних моделей типових електричних вузлів навантаження. Зокрема, які складаються з трансформатора та асинхронних електропроводів, а також трансформатора та синхронних проводів. Порівняльний аналіз роботи останніх з точки зору компенсації реактивної потужності.

Для реалізації мети роботи розв'язані такі **задачі**:

Побудова математичних моделей елементів типових вузлів навантаження:

- математична модель нелінійного трансформатора;
- математична модель асинхронного електроприводу;
- математична модель синхронного електроприводу;
- математична модель вузла навантаження з асинхронними проводами (з компенсаційною батареєю та без неї);
- порівняльний аналіз в сенсі компенсації реактивної потужності.

Об'єктом даної роботи стали вузли електричного навантаження з асинхронними і синхронними проводами.

Предмет роботи: аналіз перехідних та усталених процесів в типових вузлах електричного навантаження, які містять компенсаційну батарею і ні.

В даній роботі будуть використовуватися такі **методи досліджень**:

- загальна теорія прикладної електродинаміки з використання інтегральних та диференціальних форм;
- рівняння прикладної електротехніки;
- загальна теорія звичних нелінійних диференціальних рівнянь;
- використання явних чисельних методів для інтегрування звичайних нелінійних диференціальних рівнянь (явний метод Рунге-Кута IV-порядку);
- прикладні алгоритмічно-програмні комплекси (Visual Fortran, C++);
- графічні оператори

У статті [1] йдеться про створення такого аналітичного методу, яким можна буде досягнути досить суттєвих результатів, а саме повної компенсації реактивної потужності, для цього привичну нам схему послідовної компенсації реактивної потужності пропонують замінити на схеми з паралельним способом компенсації реактивної потужності, але з одним нюансом: це все підходить для вузлів електричного навантаження з низькими показниками напруги.

Для розгляду можна звернути увагу на статтю [2], в якій основними цілями стане компенсація реактивної потужності у вузлах де значення останньої динамічно змінюються, з цих причин проводилися аналізи по впливам певних режимів компенсації реактивної потужності на роботу вузлів електропостачання підприємств.

У зв'язку з використанням пристроїв компенсації реактивної потужності можна розглянути статтю [3], яка піднімає питання на рахунок цих пристроїв, але для міських мереж. Потрібно розуміти, що стаття буде актуальна і для вузлів електричного навантаження, через використання подібних пристроїв.

У статті [4] глобально піднімається питання компенсації реактивної потужності, від знаходженням недоліків при розрахунку параметрів для пристроїв компенсації до аналізів режимів часткової, а також і повної компенсації реактивної потужності у вузлах електричного навантаження.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Повна, активна та реактивна потужність

За весь період існування електромереж виділили три основні потужності: активна, реактивна та повна, які використовуються як і в розрахунках так і в позначеннях параметрів електричної апаратури.

Потрібно розуміти, що для кіл з змінним струмом не найкращий варіант використовувати формули для розрахунку потужностей постійних струмів, по причині того, що ми знаходитимемо тільки миттєві значення для потужності, яка буде дуже сильно залежати від часу. Для цього можна скористатися інтегруванням миттєвих значень потужності за певний період, щоб в нас була змога знаходити потужності в колах з змінними значеннями напруги та струму. Тому розрахунок потужності, яка буде зв'язана з змінними синусоїдальними струмами, а вони і з напругами для нас є в пріоритеті.

1.1.1 Активна потужність. Якщо за певний період T взяти середнє значення миттєвих потужностей ми отримаємо необхідну нам активну потужність, яку можна записати в такому варіанті [7]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (1.1)$$

В разі того коли ланцюг буде відноситися до однофазного струму, який буде синусоїдальним буде справедливий вираз[7]:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

в ньому U та I – відповідатимуть середньоквадратичним значенням, а значення φ – відобразить кут зсуву фаз, який буде між напругою та струмом. Дані параметри можна знаходити за допомогою вольтметрів і амперметрів або вони можуть бути задані.

Активною потужністю можна охарактеризувати як швидкість, яка необхідна для перетворення електричної енергії, наприклад її можна перетворити в теплову або в іншому випадку в електромагнітну енергію.

Для розрахунку активної [9] потужності можна піти іншим шляхом і знайти її за допомогою двох інших параметрів: у випадку коли відома сила струму у розрахунках можна використовувати активний опір r , а у разі коли відома напруга застосовуємо параметр електромагнітної провідності g :

$$P = I^2 \cdot r = U^2 \cdot g \quad (1.3)$$

Не залежно від виду струму в ланцюзі потрібно зазначити, що для розрахунку активної потужності в однофазному ланцюзі потрібно знайти потужності кожного активного елемента і додати їх, а для трифазних ланцюгів буде відноситися сума потужності кожної з фаз [7].

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (1.4)$$

Потрібно зазначити, що активну потужність можна знаходити і через повну потужність, про яку буде йти мова пізніше і тому виведемо ще одне рівняння для знаходження активної потужності через вираз (1.4).

Одиниця вимірювання активної потужності у всіх випадках буде – ват.

1.1.2 Реактивна потужність. Дану величину можна характеризувати як навантаження, яке буде виникати у електротехнічній апаратурі в разі коли енергія в електромагнітних полях починає коливатися. Дані обставини будуть на пряму стосуватися кіл в яких протікатиме синусоїдальний струм [7].

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.5)$$

даний вираз має ті самі значення як вираз (1.2), але зсув між фазами у даному випадку буде множитися в синусоїдальній формі.

Схожість реактивної потужності до активної в тому, що її також можна знаходити за допомогою повної потужності про яку поговоримо в наступному пункті 1.1.3. Вираз для розрахунку реактивної потужності [7]:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.6)$$

Тепер необхідно поговорити і про фізичний сенс для цього типу потужності [9] – з джерела живлення енергія проходить через кожен реактивний елемент кола, наприклад за такий елемент може виступати конденсатор або обмотка індуктивності або й самі обмотки двигунів, після чого через перелічені елементи повертається назад в джерело живлення. Даний процес як і у випадку з активною потужністю відбувається за певний період T .

Також потрібно сказати, що значення величини виразу (1.5) буде залежати дуже сильно від синусу зсуву фаз [9] : якщо $\sin\phi$ буде знаходитися в проміжку від -90° до 0 градусів то всі величини набудуть від’ємних значень, а якщо $\sin\phi$ буде знаходитися в проміжку від 0 градусів до $+90^\circ$ то такі значення будуть додатні. Значення проміжків будуть залежати від елементів, які під’єднані в коло: під’єднання індуктивності призведе до виникнення позитивних величин, а під’єднання ємності до негативних. З цього всього для реактивної потужності можна дійти висновки що в роботі електричного струму вона не братиме ніякої участі.

Одиниця вимірювання реактивної потужності у всіх випадках будуть – реактивні вольт-ампери.

1.1.3 Повна потужність. Прийшов час розглянути і повну потужність, яка згадувалася декілька разів раніше. Визначення цієї величини на пряму залежать від активної і реактивної потужності [7]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.7)$$

в якому P – відповідає активній потужності, а Q – в свою чергу за реактивну потужність.

Другим варіантом знаходження повної потужності буде такий вираз [7]:

$$S = U \cdot I \quad (1.8)$$

де I – буде відноситися до діючих періодичних значень для електричного струму, який протікає в ланцюзі, U – стосуватиметься до напруги, яка знаходиться в затискачах ланцюга.

Потрібно не забувати і те що ми можемо знаходити векторні значення даних потужностей з виразу:

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q} \quad (1.9)$$

Якщо розглядати повну потужність з точки практичного значення [9] тоді її потрібно описувати як величину навантаження, яку підводиться до споживача і яка на пряму буде залежати від споживаної споживачем струмів, не зважаючи на кількість використаної ним енергії.

Як і попередні потужності для повної виділили окремі одиниці вимірювання у вигляді – вольт-ампер.

1.2 Компенсація реактивної потужності у вузлах електричного навантаження

Попередній розділ був даний для того, щоб ми розуміли різницю між трьома типами потужності і дійшли до потреб компенсації реактивної потужності.

Для початку зазначимо те, що всі споживачі мають справу з змішаним навантаження [8], яке містить в собі активно-індуктивний характер, а це в свою чергу означає, що йде споживання обох типів потужності, як активної так і реактивної.

В заключення з попереднім розділом (1.1) можна стверджувати, що для активної потужності притаманне виконання корисної роботи у вигляді перетворення енергії. В совою ж чергу для реактивна потужність виконувати подібну роботу не притаманно, а насправді вона тільки те й робить, що затрачається на створення окремих електромагнітних полів для обладнання підстанцій. В приклад обладнання можуть бути використанні асинхронні або синхронні двигуни, силові трансформатори, приладах для освітлення та інші.

До причин компенсації [8] можна віднести ще й збільшення діаметру для перерізу проводів прокладених повітряними або кабельними лініями у зв'язку зі

збільшенням навантаження, яке продукує в мережу реактивна потужність. Також треба і розуміти, що чим більше буде в мережу йти реактивної мережі тим менше можна буде передавати активної, а це напряду може призвести до погіршення якості електроенергії.

За для усунення негативних наслідків від реактивної потужності нам потрібно нам потрібно її зменшити, а для цього найкращим способом стане під'єднання у вузол електричного навантаження компенсуючих пристроїв. В ролі таких пристроїв можна використовувати як синхронні проводи так і конденсаторні батареї у випадку з іншим електрообладнанням. Якщо нами будуть використовуватися такі пристрої у вузлах ми зможемо не тільки зменшувати реактивну потужність, яка потрапляє в мережу, а разом з цим і піднімати коефіцієнт корисної дії в проміжку від 0.93 до 0.97, що достатньо підвищує ефективність роботи. У такому випадку можна звернути увагу і на економічний еквівалент, який стосуватиметься реактивної і активної потужності: при зменшенні реактивної потужності, яка подається в мережу, пропорційно до неї будуть зменшуватися і втрати активної потужності в вузлах електричного навантаження.

Перейдемо до розгляду видів пристроїв компенсації реактивної потужності [8]:

Перш за все, досить хорошим вибором стануть синхронні компенсатори, через те що вони стануть головними в компенсації реактивної потужності усунувши додаткові втрати, які будуть потребуватися для живлення, а це до економічного еквіваленту, про який говорилося раніше.

Перейшовши до конденсаторних установок у вигляді конденсаторної батареї можна виділити три основних типи компенсації реактивної потужності у вузлах електричного навантаження, які будуть відноситися для окремих груп обладнання залежних від габаритів, часу компенсації та інших суттєвих чинників [8]:

- одиночна компенсація [8] – один з найкращих варіантів у випадках коли потребується довготривала в часі компенсація реактивної потужності. Крім

цього підходить для обладнання, яке працює при потужності в діапазоні 20 кіловат;

- групова компенсація [8] – даний тип компенсації буде стосуватися виключно вузлів навантаження, які будуть в собі містити певну кількість індуктивних навантажень, головне щоб вони знаходилися досить близько один від одного і їх вмикання було спільним і одночасним. Для цього в економічних цілях можна використати всього одну конденсаторну батарею.

- централізована компенсація [8] – досить розвинутий спосіб компенсації у зв'язку з тим, що ввімкнення батареї не можуть давати змінних значень реактивної потужності, яку потребують підприємства, призводить до таких явищ як: недокомпенсації або перекомпенсації електричного обладнання. Для усунення цих явищ у конденсаторних установках передбачується монтаж пристрою для контролю – контролера. Даний пристрій буде тримати компенсацію реактивної потужності у необхідних нормах для усунення випадків перевищення або недостачі реактивної потужності в мережі.

Конденсаторні батареї будуть розглянуті у розділі (2.4), але опишемо формулу для потужності конденсаторних установок [10]:

$$Q_c = P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad (1.10)$$

де $tg\varphi_1$ – являє собою коефіцієнт потужності перед тим як у вузол електричного навантаження приєднали компенсаційний пристрій;

$tg\varphi_2$ – цей показник навпаки буде стосуватися коефіцієнтів потужності після проходження навантаження через компенсаційний пристрій.

Можна прийти до висновків, що суттєвим способом є централізована компенсація у зв'язку з автоматизацією регулювання реактивної потужності.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Трансформатори

2.1.1 Конструкція та засади праці елемента. Трансформатором можна назвати електромагнітним апаратом у якому відсутні будь-які рухомі частини і основною задачею даного апарата являється підвищення або пониження значень напруг, струмів не змінюючи потужності [15].

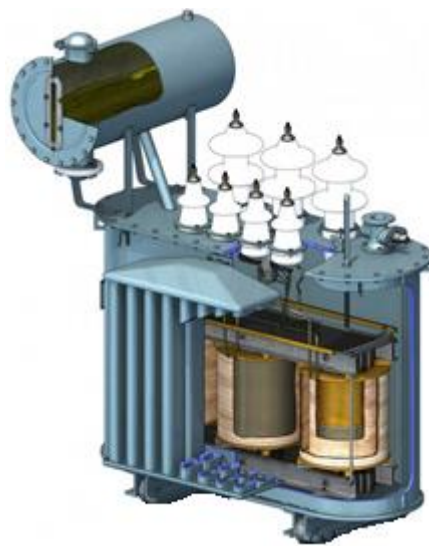


Рисунок 2.1 – Силовий трансформатор в розрізі

Основним елементом будь-якого трансформатора являється ламінований магнітопровід, на якому розміщуються дві, три або і більше обмоток. Пристрій, який має всього одну обмотку отримав назву дросель, ще така обмотка отримала назву котушки з осердям виконаним із сталі. Ламінування даного магнітопроводу є обов'язковою умовою для ослаблення вихрових струмів, які протікають по катушці, призводячи до розмагнічувальних дій магнітопроводу [13]. Це можна було зустріти в самих перших трансформаторах, які мали повністю суцільне осердя і через це вихрові струми призводили до повного розмагнічування осердя, що призводило до нездатності трансформаторами виконувати своїх прямих обов'язків трансформації напруги. Потрібно не забувати, що ці струми призводили до нагріву, який зменшував коефіцієнт

корисної дії апарата. В порівняння, сучасні трансформатори, які використовуються в промисловості має коефіцієнт 99.9%, а це в свою чергу показує, що трансформатори є найекономічнішим електротехнічним апаратом, що був винайдений людьми не зважаючи на його габарити.

Даний пристрій [15] виконується в різних варіаціях залежних від способів охолодження до різних будов магнітопровода. Основним критерієм, за яким можна виділити це кількістю фаз їх поділяють на однофазні, трифазні та багатофазні. Самими простими як і за будовою так і розрахунками являються однофазні трансформатори і мають дві обмотки. Зазначимо і те що є специфічний по будові обох обмоток на одне осердя трансформатор, який отримав назву автотрансформатор.

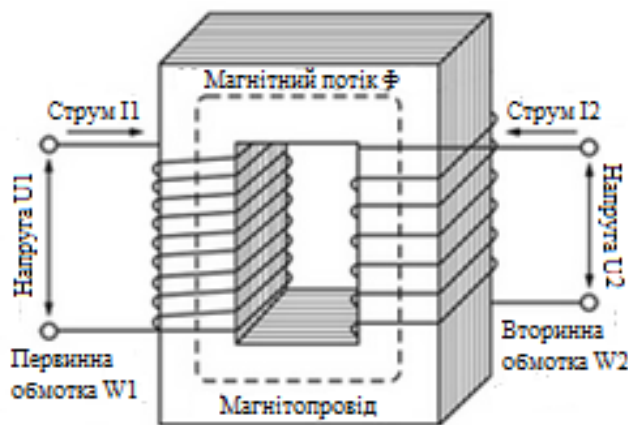


Рисунок 2.2 – Будова магнітопровода з двома обмотками

Одна з обмоток, яка під'єднується до джерела живлення буде називатися первинною. Через це всі параметри, які будуть стосуватися даної обмотки наприклад струм і напруга, які протікають в ній або кількість витків обмотки будуть позначатися з індексом 1, з рисунку 2.2 видно дані параметри обмотки (I_1 , U_1 , W_1). Натомість та обмотка, яка знаходиться після трансформації і віддає свої величини в електроенергію отримала назву вторинної обмотки і всі параметри отримали 2 індекс (рисунок 2.2), параметри I_2 , U_2 та W_2 [15]. Для трифазних трансформаторів нічого не змінюється, лише первинною або вторинною обмоткою потрібно називати сукупність всіх трьох фазних обмоток, що стосується однієї з сторін напруги.

Для розуміння як позначаються графічно на схема однофазні та трифазні трансформатори розглянемо Рисунок 2.3. На ньому зображені 6 графічних позначень [13], серед яких 1 – 3 будуть стосуватися виключно однофазних трансформаторів, а 4 – 6 в свою чергу трансформаторів, які мають три фази.

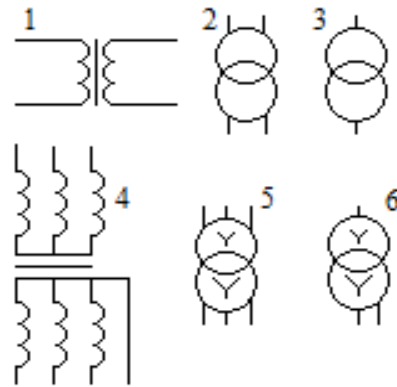


Рисунок 2.3 – Графічні позначення однофазних і трифазних трансформаторів

Розглянувши саму середину трансформатора можна повернутися до Рисунку 2.1 і розписати всі елементи, які входять до складу суцільного трансформатора [13]

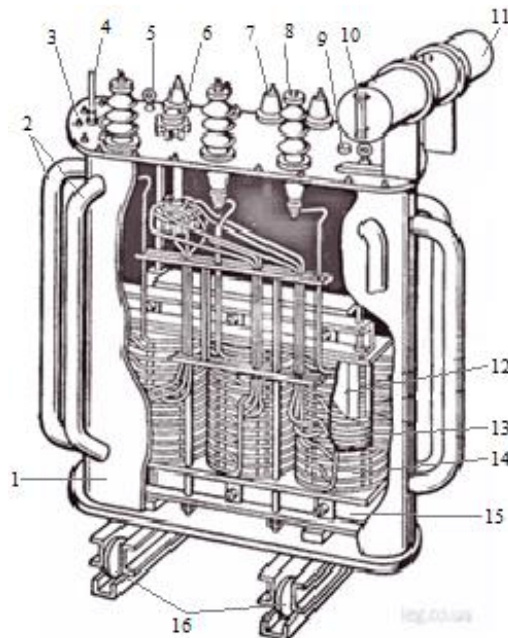


Рисунок 2.4 – Будова трансформатора

До таких елементів відносять [13]: 1 – бак, в якому знаходяться обмотки повністю залиті трансформаторним маслом; 2 – циркуляційні труби, якими циркулює масло; 3 – кришка; 4 – термометр для контролю температури масла;

5 – піднімне кільце для визначення якості масла; 6 – регулятор напруги; 7, 8 – вводи обмоток верхньої сторони навантаження і нижньої сторони навантаження; 9 – пробка отвір для доливання масла; 10 – масловказівник, який вказує на рівень масла в трансформаторі; 11 – розширювач; 12 – магнітопровід; 13, 14 – первинна і вторинна обмотки трансформатора; 15 – ярмова балка; 16 – катки для пересування апарата, але у всіх вони присутні.

Для того щоб дізнатися параметри трансформатора на один з його боків знаходиться щиток, на якому пишуть головні показники, які пригодяться при виборі самого трансформатора [13]. До таких параметрів можна віднести напруги для вищої та нижчої сторони навантаження; повна потужність, яку витримує трансформатор; лінійні струми залежні від номінальних потужностей; кількість фаз; трансформаторну частоту; схему разом з групою сполучення, яка знаходиться в трансформаторі; максимально допустимий струм у випадку короткого замикання; період на який трансформатор може застосовуватися (довготривалий або короткочасний) і на завершення описують тип яким може бути охолоджений трансформатор.

Згадуючи про охолодження, то можна зазначити, що є два відомих варіанта [13]. Першим є сухе охолодження, що стосується виключно повітря, а другим можна зазначити охолодження оливами, до яких можна віднести напряму трансформаторне масло.

Зазначимо і те що у випадку коли напруга на первинних обмотках трансформатора є нижчою від вторинної, це не означає що обмотки трансформатора виконані не правильно, а насправді такий апарат просто підвищує значення і тому отримав назву підвищувальних. У випадку коли все навпаки і напруга на первинній стороні є більшою за напругу на вторинній, то такі трансформатори відносяться до понижувальних [13].

Диференціальні рівняння для розрахунку параметрів трансформатора є невід'ємною частиною для розгляду [14]. Для початку розглянемо як у осерді однофазного трансформатора рухаються магнітні потоки (Рисунок 2.5). Після

чого ми зможемо розпочати складати диференціальні рівняння для трансформатора.

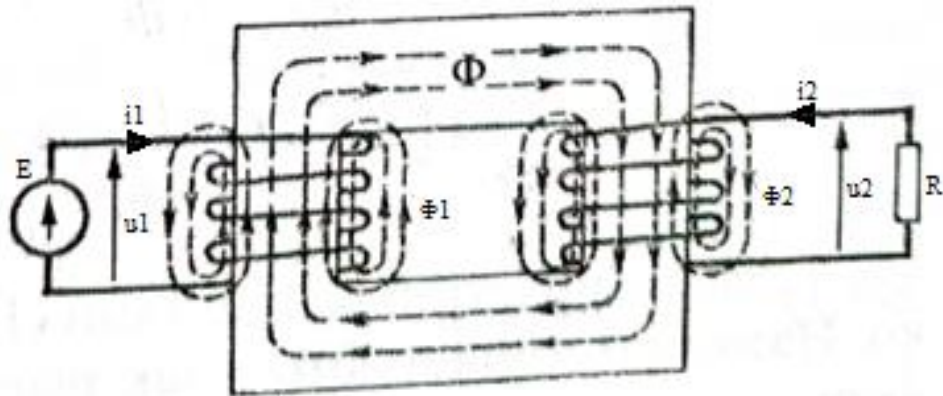


Рисунок 2.5 – Рух магнітних потоків по трансформатору

Розпочнемо з диференціальних рівнянь первинної обмотки [14]:

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 \quad (2.1)$$

для вторинної обмотки:

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 \quad (2.2)$$

Знайдемо основні і розсіюванні потокозчеплення [14]:

$$\psi_1 = L_{\sigma 1} + w_1 \Phi \quad (2.3)$$

$$\psi_2 = L_{\sigma 2} + w_2 \Phi \quad (2.4)$$

За законом рівноваги магнітних напруг і електрорушійних сил контура знаходимо такий вираз [14]:

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 = \rho \Phi \quad (2.5)$$

де ρ буде визначатися так [14]:

$$\rho = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (2.6)$$

В даному рівнянні l – довжина середини магнітопровода; S – поперечний переріз магнітопровода;

Обрахувавши вираз (2.5) ми знайдемо магнітний потік, підставимо його у (2.3) і (2.4) зможемо знайти повні потокозчеплення [14]:

$$\psi_1 = (L_{\sigma 1} + L_1)i_1 + Mi_2 \quad (2.7)$$

$$\psi_2 = Mi_1 + (L_{\sigma 2} + L_2)i_2 \quad (2.8)$$

в якому L_1 , L_2 , M – являють собою як коефіцієнт самоіндукції, так і коефіцієнт взаємоіндукції не залежно чи для первинної чи вторинної обмотки [14]:

$$L_1 = \frac{w_1^2}{\rho}; \quad L_2 = \frac{w_2^2}{\rho}; \quad M = \frac{w_1 w_2}{\rho} \quad (2.9)$$

Тепер з допомогою формул (2.1), (2.2) і (2.9) ми можемо вивести диференціальне рівняння, яке на пряму буде стосуватися двообмоткового трансформатора [14]:

$$\begin{aligned} (L_{\sigma 1} + L_1) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + r_1 i_1 &= u_1 \\ M \frac{di_1}{dt} + (L_{\sigma 2} + L_2) \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 &= u_2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

По причині не частого використання виразу (2.9) на практиці кращим варіантом стане розглянути так звані приведені диференціальні рівняння [14]. Їх використання є більш зручнішим при побудовах трансформаторних схем. Через те що в цих рівняннях інший принцип розрахунків, нам прийдеться розглянути відповідний до них параметр, який стосується будь-якого трансформатора – коефіцієнт трансформації.

Магнітне поле [7], що знаходиться в осерді трансформатора індукує особисті електрорушійні сили і для первинної, так і для вторинної:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.11)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.12)$$

Коефіцієнт трансформації [13] можна дуже легко знайти з рівнянь (2.11) і (2.12), просто розділяємо електрорушійну силу для первинної обмотки на електрорушійну силу для вторинної (це може змінитися тільки у випадку коли друга буде більша за першу і нам прийдеться розділяти електрорушійну силу вторинної на електрорушійну силу первинної) [14]:

$$c = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (2.13)$$

Як зазначалося вище коефіцієнт корисної дії для трансформаторів сягає 99%, але він може зменшуватися у випадку коли є малі значення навантаження або коли сам трансформатор призначений для малих потужностей [15]. Враховуючи, що трансформатори використовуватимуться при максимальних значеннях коефіцієнта ми можемо вважати що потужність на первинній обмотці буде однакою за значеннями до вторинної потужності [14]:

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 \quad (2.14)$$

За такими даними струми, які протікають в трансформаторі будуть обернено-пропорційні напругам, які теж знаходяться у трансформаторі, тому можна зрозуміти що і число витків для первинної і для вторинної становитимуть однакове значення [14]:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{c} \quad (2.15)$$

В співвідношенні від витків для струму і напруги обох обмоток знайдемо за наступними двома рівняннями [14]:

$$i'_2 = i_2 / c; \quad u'_2 = c u_2 \quad (2.16)$$

Рівняння вторинної обмотки (1.10) множимо на коефіцієнт трансформації, але не забуваємо врахувати попередню формулу [14]:

$$\begin{aligned} (L_{\sigma 1} + L_1) \frac{di_1}{dt} + cM \frac{di'_2}{dt} &= u_1 \\ cM \frac{di_1}{dt} + c(L_{\sigma 2} + L_2) \frac{di'_2}{dt} + c^2 r_2 i'_2 &= u'_2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Введемо для розгляду додаткові позначення, які потрібні будуть при розрахунках трансформаторів [14]:

$$L_1 = \frac{w_1^2}{\rho} = L; \quad cM = \frac{w_1}{w_2} \frac{w_1 w_2}{\rho} = L; \quad c^2 L_2 = \frac{w_1^2}{w_2^2} \frac{w_2^2}{\rho} = L \quad (2.18)$$

де L – являє собою головну індуктивність [7] для трансформатора.

Для повноти картини вираз (2.16) розширимо індуктивністю розсіяння, а також резистивним опором, який знаходиться у вторинній обмотці [14]:

$$L'_{\sigma 2} = c^2 L_{\sigma 2}; \quad r'_2 = c^2 r_2 \quad (2.19)$$

Після всіх зусиль в кінцевому результаті ми можемо записати необхідне нам для трансформаторів приведене диференціальне рівняння, яке з позначеннями виразів (2.16) і (2.18) набуде вигляду [14]:

$$\begin{aligned} (L_{\sigma 1} + L_1) \frac{di_1}{dt} + L \frac{di'_2}{dt} &= u_1 \\ L \frac{di_1}{dt} + c(L'_{\sigma 2} + L_2) \frac{di'_2}{dt} + r_2 i'_2 &= u'_2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Використання цих диференціальних рівнянь буде залежати тільки знання вихідних даних, які можуть міститися на щиті трансформатора, у разі їх відсутності можна скористатися каталогами електротехнічної апаратури або засобами масового користування.

Перейдемо до розгляду заступних схем для трансформаторів [13]. Звичайно при знаходженні параметрів трансформатора потрібно розраховувати рівняння, які були наведені в попередніх розділах, але щоб спростити цей процес можна використати заступні схеми трансформатора. Для уникнення неоднозначності заступна схема описується тими ж рівняннями, тому знаходження параметрів трансформатора не стає проблемою.

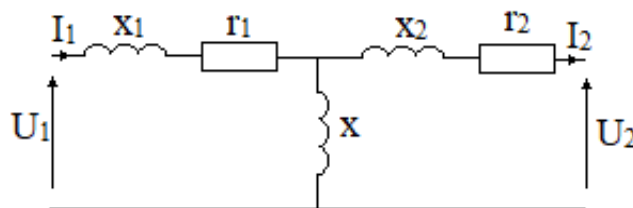


Рисунок 2.6 – Загальна заступна схема трансформатора

Рисунок 2.6 показує вигляд, який може мати заступна схема [13]. Тому запишемо для неї рівняння електричного кола використовуючи метод контурних струмів [14]:

$$\begin{aligned} (r_1 + j(x_{\sigma 1} + x))I_1 + jxI'_2 &= U_1 \\ jxI_1 + (r_2 + j(x'_{\sigma 2} + x))I'_2 &= U_2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Розглянувши, вираз (2.21) можна стверджувати, що дана заступна схема є самостійною і її використання в складніші схеми стає можливим, крім цього трансформатор буде працювати як індивідуальний елемент [15].

Не виключенням є і те що рисунок 2.6 постійно ускладнюють резистором, яким відображаються втрати в сталі, такий елемент можна під'єднати до схеми як послідовно так і паралельно. Отримаємо нову заступну схему (рисунок 2.7), яка є значно більше застосовуваною при розрахунках параметрів трансформатора [14].

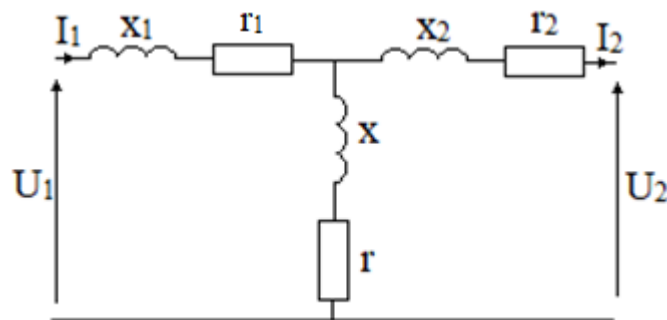


Рисунок 2.7 – Відома заступна схема для трансформаторів

Для прискорення розрахунків зменшимо чисельність дослідів і згрупуємо параметри схеми [14].

$$\begin{aligned} r_1 \approx r_2' = \frac{r_k}{2}; \quad x_{\sigma 1} \approx x'_{\sigma 2} = \frac{x_k}{2} \\ r + jx \gg r_k + jx_k \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.1.2 Математична модель трансформатора. Для того, щоб сформувати математичні моделі трансформатора необхідно скористатися певними формулами [12]:

$$i_{mA} + i_{mB} + i_{mC} = 0 \quad (2.23)$$

$$\psi_{mA} + \psi_{mB} + \psi_{mC} = 0 \quad (2.24)$$

$$i_m \equiv [i_{mA} \quad i_{mB}]^T = [i_{1A} + i_{2A} \quad i_{1B} + i_{2B}]^T \quad (2.25)$$

для усунення запитань вираз (2.25), (2.26) і (2.27) виражаються у якості матриці.

Після розв'язання виразів (2.23-2.25) можна записати основоположні формули, які застосовуються для побудови математичних моделей [12]:

$$G \equiv \begin{bmatrix} (\alpha_{\sigma 1A} + \alpha_{\sigma 2A} + \rho_A)^{-1} & - \\ - & (\alpha_{\sigma 1B} + \alpha_{\sigma 2B} + \rho_B)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_A & - \\ - & \rho_B \end{bmatrix} = \text{diag}(\rho_A; \rho_B) \quad (2.27)$$

З матричних формул (2.26) і (2.27) знайдемо невідомі нам параметри за таких формул [12]:

$$G_1 = \alpha_{\sigma 1} G, \quad G_2 = \alpha_{\sigma 2} G \quad \rho_i = \left(\frac{\partial \psi_{m,j}}{\partial i_{m,j}} \right)^{-1}, \quad j = A, B \quad (2.28)$$

Враховавши всі наведені вище вирази (2.23 – 2.28) можна вивести кінцеві формули математичної моделі, що буде стосуватися трансформатора [12]:

$$\frac{di_1}{dt} = A_{11}(u_{\Sigma 1} - r_1 i_1) + A_{12}(u_{\Sigma 2} - r_2 i_2) \quad (2.29)$$

$$\frac{di_2}{dt} = A_{21}(u_{\Sigma 1} - r_1 i_1) + A_{22}(u_{\Sigma 2} - r_2 i_2) \quad (2.30)$$

В заключення коефіцієнти, які використовуються мають залежність від обернених індуктивностей, а крім цього і від струмів для намагнічування. Враховавши це отримаємо такий вид цих параметрів [12]:

$$A_{11} = \alpha_{\sigma 1}(1 - \alpha_{\sigma 1} G), \quad A_{12} = A_{21} = -\alpha_{\sigma 1} \alpha_{\sigma 2} G, \quad A_{22} = \alpha_{\sigma 2}(1 - \alpha_{\sigma 2} G) \quad (2.31)$$

Для розрахунків зазвичай параметри виразу (2.30) задаються.

2.2 Асинхронні машини

2.2.1 Конструкція та засади праці елемента. Для кращого розуміння асинхронних двигунів розберемо їх призначення, принцип дії та будову. На

рисунку 2.8 зображено як зовнішній вигляд асинхронного двигуна так і його наповнення.

Асинхронний двигун [13] – це електротехнічний пристрій, але на відміну від трансформатора має рухому і не рухому частини і використовується в основному для перетворень одного типу енергії в інший і навпаки. При перетвореннях з механічної в електричну отримаємо апарат, який працює як генератор, а коли електричну в механічну тоді апарат в режимі двигуна. В теорії рухому частину машини будуть називати ротором, а нерухома частина статором.



Рисунок 2.8 – Асинхронний двигун в розрізі

Всі машини відносяться до двох основних груп: постійного струму або змінного струму [15]. Розглянуті в даному і наступному підрозділі будуть відноситися до машин змінного струму.

Використання даних типів машин вимагає трифазної обмотки як на статорі так і в мережі для їх спроможності справно працювати [15]. Завдяки такому живленні в машині може виникати магнітне поле, яке приходить до нормальних значень використання з допомогою магнітної системи, яка знаходиться в машині. Дана система виконується з двох циліндрів: один з них повинен бути пустотілим і відноситиметься до осердя статора, а другий буде заповненим і зазначиться як осердя статора. Як і в трансформаторів проблем можуть нанести вихрові струми, тому кожне з осердь складаються повністю з листів електротехнічної сталі і для їх ізоляції обидва покривають одним або декількома тонкими шарами лаку. Для

розміщення обмоток в машині використовуються пази, які знаходяться на зовнішній стороні ротора, а у випадку статора на внутрішній стороні. Через магнітне поле [7], яке індукується в статорі, в обмотках ротора починають виникати струми, які в кінцевому результаті призведуть до магнітного поля на роторі після чого ротор обертається в ту ж саму сторону, в яку прямує поле статора. Назву асинхронний двигун для цих типів апаратів дали не просто так, а по причині того що одне магнітне поле (статора) буде завжди попереду другого (ротора) і друге не зможе наздогнати перше. Для зменшення струмів, які можуть бути індуквані ротором необхідно збільшувати швидкість обертання.

Також і увагу потрібно приділити відносним швидкостям різниць магнітних полів статора (n_1) і ротора (n), через їх відношення виникає додатковий параметр у вигляді ковзання s [14]:

$$s = (n_1 - n) / n_1 \quad (2.32)$$

Треба зазначити і те що при зростанні навантаження, яке подаватиметься на вал ротора заставить його сповільнюватися, а це вплине зразу на три параметри, які почнуть збільшуватися – ковзання, струми і електрорушійна сила [15]. Дане зростання негативно вплине на роботу машини і вона почне збільшувати свої потреби в споживанні потужності на свої потреби, а єдиним місцем звідки він це зможе зробити стане мережа.

Так що ковзання є досить важливим параметром, від якого буде залежати і якість роботи машини [15]. В сучасних асинхронних двигунах змогли досягнути чим найменших можливих значень ковзання, які знаходяться всього в 1.5 – 2% від всіх значень машини.

Розглянувши це можна звернути увагу і на саму будову машини [13] (рисунок 2.9). Основними елемента асинхронної машини як ми дізналися це статор (5) і ротор (4) в яких знаходяться обмотки. Елементів для кріплення таких як корпусу (6), кришки (1), захисних щитів (3) і кожуха (9). В якості охолодження в машині передбачений вентилятор (8) і місцем де приходить і віддається енергія – коробка зажимів.

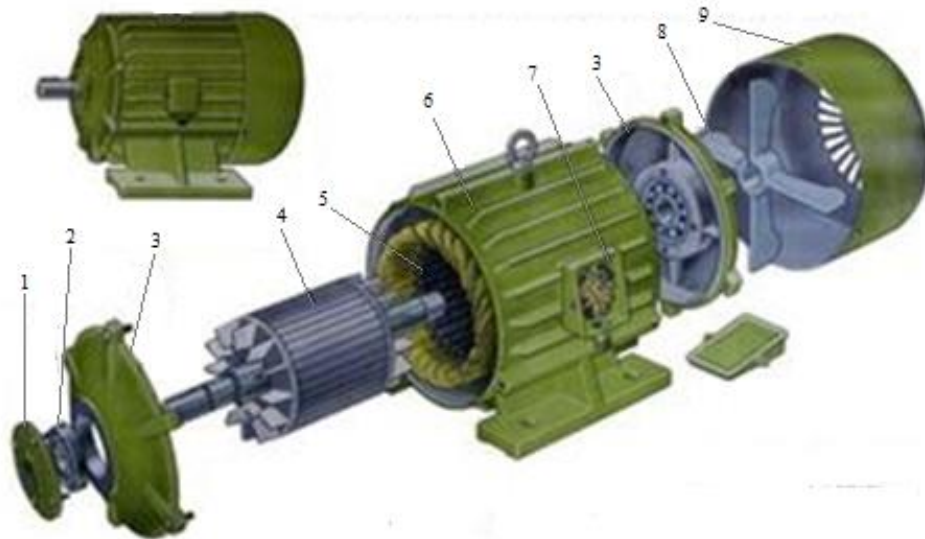


Рисунок 2.9 – Будова асинхронного двигуна

Як і для трансформаторів потрібно розглянути комплексні рівняння для знаходження параметрів асинхронної машини [14]. Без жодних сумнівів магнітні процеси, які відбуваються в асинхронних апаратах мають велику схожість до трансформаторних, тому з цього ствердження можна використовувати диференційні рівняння з пункту 2.1.1, але з деякими відмінностями. Замість первинної і вторинної обмотки в асинхронних апаратах виступлять статор і ротор, крім цього потрібно розуміти, що параметри в обох частинах різні тому і вигляд рівнянь буде відрізнятися [14]:

$$\begin{aligned} (r_1 + j\omega(L_\sigma + L))\dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}'_2 &= \dot{U}_1 \\ js\omega L \dot{I}_1 + (r'_2 + js\omega(L'_\sigma + L))\dot{I}'_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Як можна побачити друге рівняння прирівнюється нулю, у зв'язку з роботою асинхронних апаратів тільки в режимі коли отримується одностороннє живлення [13].

Щоб вираз (2.33) відповідав нашим вимогам потрібно додати певних особливостей, які напряду стосуються конструкцій апаратів. Першим що підлягатиме змін буде коефіцієнт трансформації [14]:

$$c = \frac{k_1 w_1}{k_2 w_2} \quad (2.34)$$

причиною зміни стають втрати електрорушійних сил, що протікають в обмотках.

Загальна індуктивність [14] також буде відрізнятися від трансформаторної:

$$L = k_1^2 w_1^2 / \rho \quad (2.35)$$

Всі інші вирази будуть використовуватися в такому ж виді як для трансформаторів.

Рівняння (2.33), яке стосувалося ротора можна диференціювати за часом, щоб отримати комплексне рівняння ротора [14]:

$$j\omega L \dot{I}_1 + \left(\frac{r'_2}{s} + j\omega(L'_{\sigma 2} + L) \right) \dot{I}'_2 = 0 \quad (2.36)$$

Тепер ми можемо отримати остаточні комплексні рівняння для асинхронних апаратів, але з одним додатковим елементом, а саме підставивши реактанс [14]:

$$\begin{aligned} (r_1 + j(x_{\sigma 1} + x)) \dot{I}_1 + jx \dot{I}'_2 &= U_1 \\ jx \dot{I}_1 + \left(\frac{r'_2}{s} + j(x'_{\sigma 2} + x) \right) \dot{I}'_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Потрібно зазначити, що схожість комплексних рівнянь, які застосовуються для трансформатора і асинхронних машин [13] є практично ідентичні з одною відмінністю, що рівняння ротора в собі містять розглянуте раніше ковзання.

Для кращого розуміння розглянемо заступні схеми асинхронних апаратів. Якщо рівняння трансформатора і асинхронної машини подібні то це вплине і на схожість заступних схем. Відмінністю схем стане резистор для регулювання параметрів схеми, який для уподібнення схем записується [14]:

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + \frac{(1-s)}{s} r'_2 = r'_2 + r_s \quad (2.38)$$

Враховуючи цей вираз ми можемо отримати такий зміст для рівняння – перша частина буде стосуватися виключно втрат, які будуть в обмотках ротора під час його роботи і друга частина, яка на пряму залежатиме від механічного навантаження, яке буде споживати ротор. Тому заступна схема матиме наступний вид [13]:

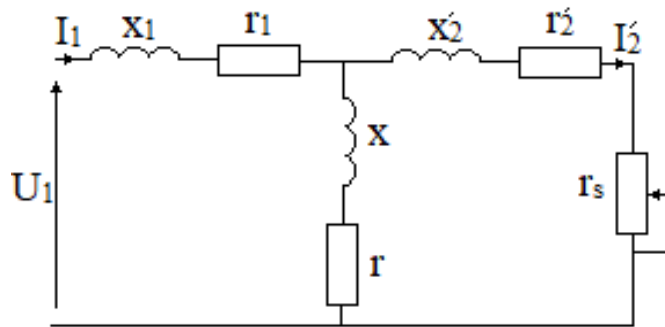


Рисунок 2.10 – Заступна схема для асинхронних двигунів

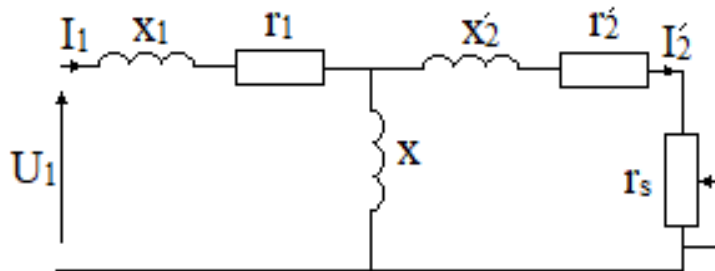


Рисунок 2.11 – Спрощена заступна схема

У нашому випадку можна відійти від вирішень рівнянь і користуватися виключно заступною схемою [13] (рисунок 2.10), але для більш ефективного використання її можна трошки вдосконалити спростивши вітку намагнічування (викинувши з рисунку 2.10) і отримаємо спрощену схему (рисунок 2.11).

2.2.2 Математична модель асинхронних проводів. Щоб отримати остаточні рівняння математичної моделі [12] розглянемо такі матричні формули:

$$[i_A \ i_B]^T = [i_{SA} \ i_{SB}]^T + \Pi [i_{RA} \ i_{RB}]^T = [i_{SA} \ i_{SB}]^T + [i_{RA}^{\Pi} \ i_{RB}^{\Pi}]^T \quad (2.39)$$

$$M = \begin{bmatrix} \alpha + \frac{2}{3} \frac{\rho - \tau}{i_m^2} (2i_A^2 + i_A i_B) & \alpha + \frac{2}{3} \frac{\rho - \tau}{i_m^2} (i_A^2 + 2i_A i_B) \\ \alpha + \frac{2}{3} \frac{\rho - \tau}{i_m^2} (i_B^2 + 2i_A i_B) & \alpha + \frac{2}{3} \frac{\rho - \tau}{i_m^2} (2i_B^2 + i_A i_B) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

З формул матриць (2.39) і (2.40) знайдемо деякі параметри [12]:

$$\tau = \frac{1}{L_m} = \left(\frac{\psi_m}{i_m} \right)^{-1}, \quad \rho = \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial i_m} \right)^{-1}, \quad \alpha = \tau + \alpha_{\sigma S} + \alpha_{\sigma RL} \quad (2.41)$$

$$i_m = 2\sqrt{(i_A^2 + i_A i_B + i_B^2)}/3, \quad \psi_m = 2\sqrt{(\psi_A^2 + \psi_A \psi_B + \psi_B^2)}/3 \quad (2.42)$$

$$G_S = \alpha_{\sigma S} G, \quad G_R = \alpha_{\sigma RL} G, \quad G = \begin{bmatrix} B + b_A i_A & b_B i_A \\ b_A i_B & B + b_B i_B \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$R = 1/(\alpha_{\sigma S} + \alpha_{\sigma RL} + \rho), \quad B = 1/(\alpha_{\sigma S} + \alpha_{\sigma RL} + \tau) \quad (2.44)$$

$$b = \frac{2}{3} \frac{R - B}{i_m^2}, \quad b_A = b(2i_A + i_B), \quad b_B = b(2i_B + i_A) \quad (2.45)$$

Розглянувши всі вирази (2.39 – 2.45) можна отримати остаточні рівняння математичної моделі асинхронних проводів [12]:

$$\frac{di_S}{dt} = A_S (u_S - r_S i_S) + A_{SR} (-u_R - \Omega \Psi_R - r_{RL} i_R) \quad (2.46)$$

$$\frac{di_R}{dt} = A_{RS} (u_S - r_S i_S) + A_R (-u_R - \Omega \Psi_R - r_{RL} i_R) + \Omega i_R \quad (2.47)$$

Остаточне рівняння моделі є [12], але ми маємо невідомі значення індуктивностей в машині тому для цього необхідно застосувати такі формули []:

$$A_S = \alpha_{\sigma S} (1 - \alpha_{\sigma S} G), \quad A_{SR}^* = A_{RS}^* = -\alpha_{\sigma S} \alpha_{\sigma RL} G, \quad A_R^* = \alpha_{\sigma RL} (1 - \alpha_{\sigma RL} G) \quad (2.48)$$

$$A_{SR} = A_{SR}^* \Pi, \quad A_{RS} = \Pi^{-1} A_{RS}^*, \quad A_R = \Pi^{-1} A_R^* \Pi \quad (2.49)$$

Як і для трансформаторів так і для асинхронних проводів вирази (2.48) і (2.49) будуть одразу відомі або для них будуть дані параметри для їх точного розрахунку.

2.3 Синхронні машини

2.3.1 Конструкція та засади праці елемента. Перейдемо тепер до синхронних машин змінного струму і опишемо призначення, принцип дії та будову. Якщо подивитися на синхронну і асинхронну машину то важко побачити, якісь суттєві відмінності в будові ротора або статора, але можуть просто добавитися деякі елементи, які будуть в обох типах приводів [15]. Тому розглянемо будову синхронної машини, але яка вже буде мати більше елементів (рисунок 2.12).

Розглянемо елементи, які використовують для побудови даних машин [13]:
 1 – виводи обмоток статора; 2 – станина збудника; 3 – щіткова траверса; 4 – щіткотримачі з щітками; 5 – задній підшипниковий щит; 6 – обмотка статора; 7 – осердя статора; 8 – колектор збудника; 9 – якір збудника; 10 – траверса щіткового механізму; 11 – кришка підшипника; 12 – контактні кільця; 13 – роликовий підшипник; 14 – вентилятор; 15 – внутрішня кришка підшипника; 16 – верхній щит; 17 – зовнішня кришка.

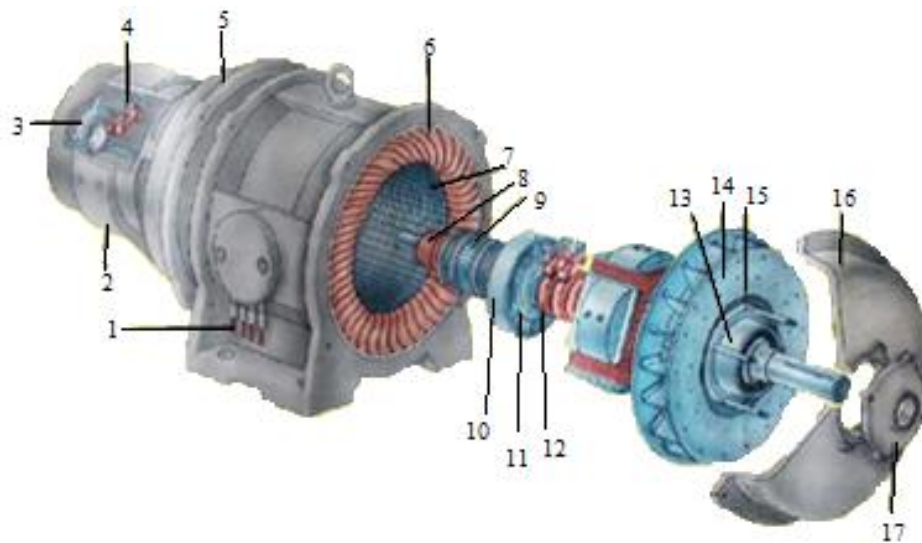


Рисунок 2.12 – Будова синхронного двигуна

Нікого не здивує те, що даний тип апаратів працює синхронно, а це означає що магнітні поля обертаються однаково, що виключає такий параметр як ковзання, яке увесь час буде мати значення нуля. Використання їх завжди супроводжується однаковою швидкістю обертів, яку робить ротор за хвилину. В даній машині є те що нас зацікавить – її можливість виступати компенсатором реактивної потужності, яка надходить з мережі.

Всі синхронні машини можуть виступати як генератори, двигуни і компенсатори [13], але з відмінністю від асинхронних, тим що вони будуть синхронними і їх конструкція буде не суттєво інша, але із значними відмінностями на практиці.

Як і в асинхронних апаратів основними елементами від яких все залежить являють собою статор і ротор (схожість один в один). Можна розрізнити

синхронні машини відносно їх полюсів, вони будуть або з явним полюсом (рисунок 2.13) або не явним полюсом (рисунок 2.14). Для збудження обмоток використовуються контактні кільця (12) разом з щітками (4), через які від джерела енергії поступає постійний струм в машину [15].



Рисунок 2.13 – Явнополюсний ротор синхронної машини

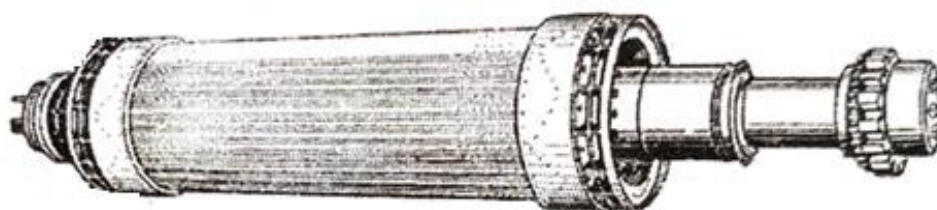


Рисунок 2.14 – Неявнополюсний ротор синхронної машини

Для синхронних апаратів притаманна стабільна швидкість обертання ротора, яка буде мати такі самі значення як частота поля [14]:

$$n = 60f/p \quad (2.50)$$

Як згадувалося раніше синхронна машина може працювати в трьох режимах, тому розглянемо їх. Першою буде синхронна машина, яка буде виступати в ролі генератора (турбогенератор або гідрогенератор).

Турбогенератор [13] – являє собою машину, яка призначається при високих оборотах в хвилину від 1500 до 3000 обертів. Для того щоб він почав працювати на турбіну подається пар. При такій роботі турбогенератор може видати потужність в районах від 500 до 800 МВА.

В протизвагу виступають гідрогенератори [13], які презентують себе як тихохідні машини з невеликими швидкостями через велику кількість пар полюсів (16-96), які використовуються для машини. Для роботи такого апарату,

необхідно щоб на лопасті турбіни падалася вода, яка буде обертати турбіну а вона заставлятиме машину працювати.

До другого буде відноситися синхронна машина, яка працює в режимі мотора [14]. Застосування їх на відміну від генераторів зростає через використання моторів у будь-які приводи з сталими швидкостями. Такі апарати завжди являються явноплюсними, які використовуються при потужностях від 40 до приблизно 8000 кВт. Через те що маса яка подається на одиницю потужності в синхронних моторів є меншою ніж у асинхронних, це означає що коефіцієнт корисної дії для синхронних моторів при однаковій швидкості має вищі значення ніж асинхронні.

Закінчуватимуть синхронні машини, які виступають як компенсатори. Для них притаманна робота при відсутності навантаження, але при струмах збудження [15]. Така здібність дає змогу керувати кількістю реактивної потужності, яка буде віддана в мережу або навпаки споживає з мережі. Через відсутність навантаження, яка подається на вал відпадає і повна механічна конструкція. Найчастіше такі компенсатори можна зустріти на підстанціях, які продукують потужність до 100 тисяч кВА.

Головні елементи машини [15] (ротор і статор) отримали і інші назви, а саме якір і індуктор. Це все напряму залежить від процесів, які відбуваються в них: якір представляє з себе місце де індукується електрорушійна сила, а індуктор - збуджує потік, який виникає в машині.

Перейдемо до нюансів, які потрібно буде врахувати при під'єднанні синхронної машини до мережі. Перш за все за формулою (1.50) визначимо частоту швидкість обертання з якою працює мотор коли він працює незалежно від інших елементів [15]. При його роботі паралельно до інших елементів, мотор і елементи повинні мати одну і ту ж саму частоту для синхронної роботи машини. Для вмикання в мережу відбувається синхронізація – частоти мережі до частоти апарата для запобігання виходу з ладу і справності в роботі.

Розглянемо комплексні рівняння для знаходження параметрів [14], які в свою чергу будуть стосуватися синхронної машини. Для синхронних машин

використовують ідентичну обмотку статора до асинхронних машин. При обертанні ротора магнітне поле індукує в статорі електрорушійну силу, яку можна знайти за таким виразом [14]:

$$E = 4fk_1k_\phi w\Phi \quad (2.51)$$

в якому k_ϕ – являє собою коефіцієнт форми, який отримує крива поля при обертаннях ротора. Він виникає при збудженнях основного магнітного поля постійними струмами.

Для синхронних машин притаманні одразу два типи збудження, які діють на магнітне поле машини [15]. Як ми зазначали раніше першим буде збудження постійними струмами, а другим стануть синусоїдальні струми, які буде індукувати обмотка статора. Через вплив поля статора відбувається процес під назвою реакція якоря.

В відмінність синхронних двигунів над асинхронними [15] виступає автоматична зміна струмів статора до струмів якоря, що призведе до потоку з сталими змінними для двох елементів. Такі дії не призводять до змін стрімів ротора як у асинхронних двигунів і все буде залежати від навантаження, яке подаватиметься на поле. Одною з проблем синхронних машин стає реакція якоря, яка стає не бажаним параметром для системи, тому її стараються приблизити до найменших значень. Для досягнення таких результатів збільшують магнітний опір, який залежить від такого параметру як повітряний проміжок.

Якщо добре розглянути ці апарати можна стверджувати, що в них існує лише один магнітний потік, але який складатиметься аж з трьох окремих потоків: потоку, який виникає при реакції якоря; потоку розсіяння, який створюють обмотки в пазах статора; потоку, який приводить в рух ротор машини. Не виключення і те що вони будуть індукувати для себе особисті електрорушійні сили. Всі ці сили буде потрібно враховувати при розрахунку загальної для пристрою електрорушійної сили [14]:

$$\dot{E} = \dot{U} + (r + j(x_\sigma + x_a))\dot{I} = \dot{U} + (r + jx)\dot{I} \quad (2.52)$$

звідки $x = x_{\sigma} + x_a$ – буде собою представляти реактивний опір в синхронному двигуні.

Тому рівняння (2.52) ми можемо назвати комплексним рівнянням за яким буде знаходитися електрорушійна сила синхронного двигуна.

Продовжимо розглядом заступні схеми синхронних апаратів [13]. Не стали виключеннями і синхронні двигуни, які також можна розраховувати за допомогою заступних схем. За їх основу буде взятий вираз (1.31), який можна застосовувати як для моторів (рисунок 1.15) так і для генераторів (рисунок 1.16).

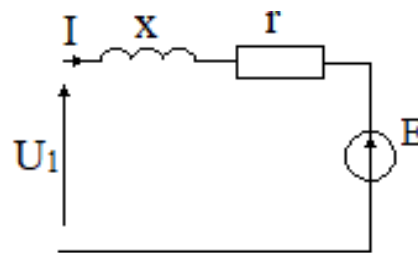


Рисунок 2.15 – Заступна схема синхронного мотора

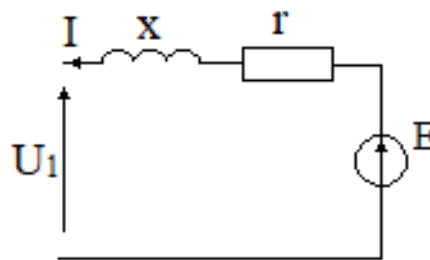


Рисунок 2.16 – Заступна схема синхронного генератора

Як можна побачити то обидві схеми ідентичні, лише напрямок струму відрізняється: для мотора (рисунок 2.15) струм буде споживатися з мережі, а для генератора (рисунок 2.16) струм буде індукуватися в машині і віддаватиметься безпосередньо в мережу [14].

Для рисунку 2.16 можна використовувати вираз (2.52) без жодних змін і можна називати рівнянням для розрахунку параметрів синхронного генератора. У випадку з рисунком 1.25 буде застосовуватися досить подібний вираз, але з невеликою відмінністю у вигляді протилежного за знаком струма [14]:

$$\dot{U} = \dot{E} + (r + jx)\dot{I} \quad (2.53)$$

Дане рівняння відноситиметься до розрахунку параметрів синхронного мотора. Якщо зсилатися на вирази (2.52) і (2.53) ми можемо зобразити векторні діаграми, які стосуватимуться генератора (рисунок 2.17) і мотора (рисунок 2.18).

Для розуміння діаграм введемо значення θ – яке відповідатиме зсуву кутів між напругою і електрорушійною силою [13]. Також потрібно і не забувати про зсув, який відбувається між напругою і струмом, у даному випадку такий кут як і всіх інших діаграмах буде позначатися φ .

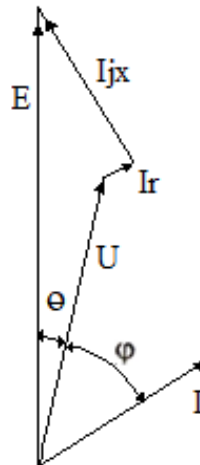


Рисунок 2.17 – Векторна діаграма для синхронних генераторів

Як у випадку з заступними схемами для асинхронних машин ми можемо їх спростити. Для цього ми нехтуємо активним опором, який виникає в обмотках статора, що спрощує як заступні схеми так і векторні діаграми синхронного мотора та генератора [13].

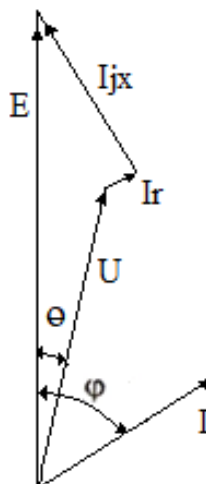


Рисунок 2.18 – Векторна діаграма для синхронних моторів

Можна подумати, що ми забуваємо про синхронний компенсатор [13], але це не так через актуальність рівнянь, заступних схем і діаграм для даного режиму роботи синхронних машин. Для відсутності протиріч – при розгляді синхронних компенсаторів ми зазначали що це мотор з простішою механічною системою, який працює без навантаження а тільки отримує струми збудження. Завдяки цьому для наших розрахунків не потрібно виводити нові формули і придумувати інші заступні схеми.

2.3.2 Математична модель синхронної машини. У зв'язку схожості між асинхронною та синхронною машиною, сенс виводити подібні формули відпадає тому переходимо одразу до матричних формул відмінних для синхронної машини [12]:

$$\psi = \begin{bmatrix} \frac{L_d}{1 + L_d(\alpha_{\sigma S} + \alpha_D + \alpha_f)} & - \\ - & \frac{L_q}{1 + L_q(\alpha_{\sigma S} + \alpha_Q)} \end{bmatrix} (\alpha_{\sigma S} \Pi_1 \Psi_S + B^T \alpha_{\sigma R} \Psi_R) \quad (2.54)$$

$$\begin{bmatrix} i_{SA} \\ i_{SB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{\sigma S} & - \\ - & \alpha_{\sigma S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Psi_{SA}] \\ [\Psi_{SB}] \end{bmatrix} - \Pi_1^{-1} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

для простішого вигляду формули (2.53) і (2.54) опишемо їх у матрично-векторному вигляді [12]:

$$i_S = \alpha_{\sigma S} (\Psi_S - \Pi_1^{-1} \psi), \quad i_R = \alpha_{\sigma R} (\Psi_R - B \psi) \quad (2.56)$$

Розглянувши вирази (2.54 – 2.56) можна отримати рівняння математичної моделі, яка стосуватиметься синхронних машин [12]:

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = u_S - r_S \alpha_{\sigma S} (\Psi_S - \Pi_1^{-1} \psi), \quad \frac{d\Psi_R}{dt} = u_R - r_R \alpha_{\sigma R} (\Psi_R - B \psi) \quad (2.57)$$

Дане рівняння буде виконуватися для машин з явним і не явним полюсом.

2.4 Компенсаційна конденсаторна батарея

2.4.1 Конструкція та засади праці елемента. Конденсаторні батареї [10]–являють собою сукупність конденсаторів, які можна використовувати при різних значеннях потужності, а також і напруги.



Рисунок 2.19 – Вигляд конденсаторної батареї

Конденсатор, з яких збирається конденсаторна батарея являє собою всього два провідники, які між собою розділені діелектриком. Основними задачами конденсаторів є або накопичення заряд з мережі, або навпаки віддавати в мережу свій заряд [14]. За умов, що до конденсатора буде прикладатися живлення між провідниками буде утворюватися магнітне поле. У зв'язку з цим між ними знаходиться діелектрик, провідність якого є досить низькою для запобігання утворення магнітного поля.

Кількість і ємність конденсаторів з яких буде складатися конденсаторна батарея залежатиме напряму від кількості реактивної потужності, яку батарея повинна буде компенсувати. Визначається потужність одного конденсатора за таким виразом [15]:

$$Q_K = \omega U^2 C \cdot 10^{-3} \quad (2.58)$$

Після цього ми може перейти до розрахунку потужності залежно від виду конденсаторної батареї, але потрібно і звернути увагу на саме з'єднання. У випадку коли батарея з'єднана в зірку вираз буде мати такого вигляду:

$$Q_K = \omega U^2 C_\phi \cdot 10^{-3} \quad (2.59)$$

а коли з'єднана в трикутник:

$$Q_K = 3\omega U^2 C_\phi \cdot 10^{-3} \quad (2.60)$$

Дані вирази будуть відноситися тільки до потужностей батареї, тому нам потрібно використати вирази, які будуть стосуватися ємностей батареї [14]:

батареї з'єднані в зірку:

$$C_\phi = \frac{Q_K \cdot 10^3}{\omega \cdot U^2} \quad (2.61)$$

батареї з'єднані в трикутник:

$$C_\phi = \frac{Q_K \cdot 10^3}{3\omega \cdot U^2} \quad (2.62)$$

За виразами (2.59 – 2.62) можна дійти висновків, що ємність конденсатора буде мати протилежний знак до значень напруги, у зв'язку з цим для меншої кількості конденсаторів доцільно їх використовувати на сторону де надходять високі напруги [14].

Потрібно врахувати що на практиці з'єднання в трикутник конденсаторів зустрічається частіше ніж в зірку [14]. Причиною цьому є менша кількість затрачених конденсаторів (аж в три рази), а це позитивно впливає на економічну вартість таких пристроїв.

На рисунку 2.20 зображена конденсаторна батарея з описом елементів, які знаходяться в середині.

Тепер перейдемо до самого головного, а це є сама збірка батареї. Для цього потрібно вибрати, яким з'єднанням будуть під'єднуватися конденсатори, що дасть змогу вибрати кількість і їх тип, але потрібно не забувати використовувати все однакове для усунення незбіжностей і неправильної роботи пристрою. Для цього можна застосувати такі рівняння [10]:

$$C_{екв} = \frac{C}{n} \quad (2.63)$$

вираз (2.64) буде стосуватися виключно при з'єднанні конденсаторів послідовно

$$C_{екв} = C \cdot n \quad (2.64)$$

натомість вираз (2.64) можна вираховувати лише при з'єднанні конденсаторів паралельно.

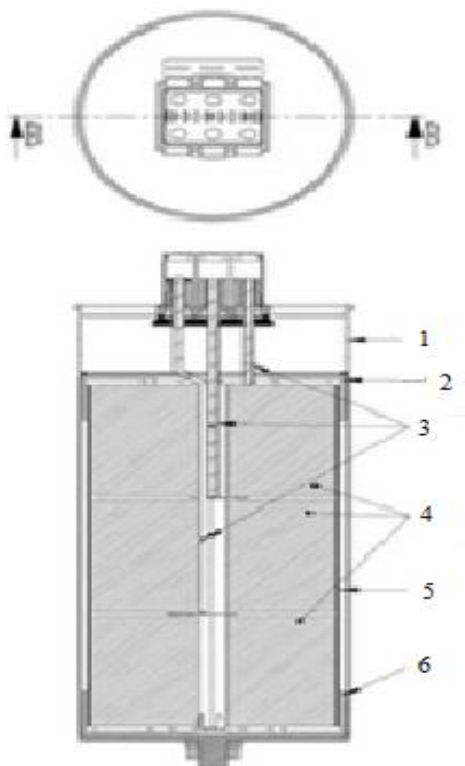


Рисунок 2.20 – Будова конденсаторної батареї: 1 – алюмінієва ємність; 2 – верхня ізоляційна кришка; 3 – три мідних провідники з механізмом відключення при надлишковому заряду ємності; 4 – три ємнісних елементи; 5 – ізоляційний папір; 6 – нижня ізоляційна кришка.

Найменування кожного з параметрів для виразів (2.63) і (2.64) будуть такі [10]: $C_{екв}$ – буде з себе представляти загальну ємність, яку витримує конденсатор; C – ємність одного з використовуваних типів конденсаторів; n – число, використаних для батареї конденсаторів.

Як всім відомо частота напруги в мережі становить 50 герц, тому для компенсації використовують спеціальні конденсатори, а саме косинусні [13]. Для них знайшли використання при потужності від 10 до 100 реактивних кіловат-ампер. Такий великий діапазон дає зрозуміти, що їх використання є досить постійним у різних вузлах електричного навантаження незалежно від параметрів, який має сам вузол.



Рисунок 2.21 – Під'єднання компенсаційної батареї до електротехнічного обладнання

В наш час конденсатори можуть мати номінальну напругу в районах від 230 вольт до 10,5 кіловольт, чим відкривають змогу збирати установки для різних напруг мережі. В кінці кінців, якщо таку групу конденсаторів об'єднати в один вузол використовуючи послідовно-паралельне або паралельно-послідовне з'єднання, тоді це можна назвати конденсаторною батареєю [10].

2.4.2 Математична модель компенсаційної батареї.

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C} \quad (2.65)$$

Як це дивно не виглядало, але через простоту пристрою і використання однакових елементів можна одразу записати математичну модель батареї (2.65) [10].

3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВУЗЛА ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Вузол електричного навантаження з асинхронними приводами без конденсаторної батареї

Застосування пристроїв для компенсації реактивної потужності є необхідною умовою, але не завжди правильним рішенням [12]. Це можна сказати у випадку коли асинхронні двигуни використовуються при невеликих потужностях або їх запуск відбувається дуже рідко. Тому з економічного погляду для здешевлення системи, відмовляються від встановлення компенсаційних пристроїв. Це на сам перед впливає через низку методів, які основані на статистичних підходах. Кожен з методів є достатньо приблизним, тому вони ставлять під сумнів свою правильність і для усунення цих сумнівів краще використовувати методи, які застосовуються в математичному моделюванні.

Для прикладу можна використати схему вузла навантаження, який складається з асинхронних двигунів, трансформатора та навантаження, яке подається нелінійно [5]. Для цього буде використовуватися схема зображена на рисунку 3.1.

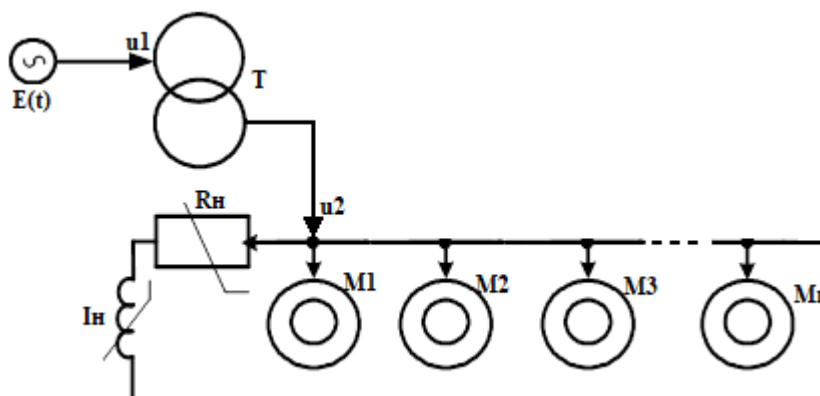


Рисунок 3.1 – Схема вузла навантаження, в якому не використовують компенсаційні пристрої

В даній схемі використовуються такі позначення як:

$E(t)$ – джерело постійної потужності (електрорушійна сила),

T – трансформатор напруги,

$M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ – асинхронні двигуни (n – певної кількості),

R_n – нелінійний резистивний опір в даному вузлі навантаження,

I_n – нелінійний індуктивний опір в даному вузлі навантаження,

U_1 та U_2 – напруги верхньої та нижньої сторони трансформатора.

Для вирішення моделі без компенсаційних пристроїв (рисунок 3.1), яку ми розглядаємо можна застосувати такі рівняння [12]:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = u_1 - r_1 i_1, \quad \frac{d\psi_2}{dt} = u_2 - r_2 i_2; \quad (3.1)$$

$$\frac{d\psi_{S,k}}{dt} = u_{S,k} - r_{S,k} i_{S,k}, \quad \frac{d\psi_{R,k}}{dt} = u_{R,k} - r_{RL,k} i_{R,k}, \quad u_{S,k} \equiv u_2; \quad (3.2)$$

$$\frac{dQ_{1j}}{dt} = i_{1j}, \quad \frac{dQ_{2j}}{dt} = i_{2j}, \quad \frac{dQ_{Sj,k}}{dt} = i_{Sj,k}, \quad \frac{dQ_{Rj,k}}{dt} = i_{Rj,k}; \quad (3.3)$$

$$\frac{d\psi_{rj}}{dt} = u_{2j} - R_j(i_{rj})i_{rj}, \quad j = A, B, C; \quad (3.4)$$

$$\frac{d\omega_{1,k}}{dt} = \frac{1}{J_{1,k}} \left(M_{EM,k} + c_{1,2,k} (\gamma_{2,k} - \gamma_{1,k}) + v_{1,2,k} (\omega_{2,k} - \omega_{1,k}) \right); \quad (3.5)$$

$$\frac{d\omega_{2,k}}{dt} = \frac{1}{J_{2,k}} \left(c_{1,2,k} (\gamma_{2,k} - \gamma_{1,k}) + v_{1,2,k} (\omega_{2,k} - \omega_{1,k}) + M(\omega_{2,k}) \right); \quad (3.6)$$

$$\frac{d\gamma_{1,k}}{dt} = \omega_{1,k}, \quad \frac{d\gamma_{2,k}}{dt} = \omega_{2,k}. \quad (3.7)$$

Розглянувши формули (3.1 – 3.7) можна зрозуміти, що в деяких з них знаходиться невідома нам величина, а саме u_2 – напруга на нижній стороні силового трансформатора. В енергетиці їй дали свою назву, яку використовують у моделях – напруга вузла навантаження. Знаходження даного елемента є складним моментом, коли дана напруга використовується у перехідних станах нашої математичної моделі вузла навантаження. Для того щоб отримати це значення для початку за законом Кірхгофа (першим) запишемо рівняння у такому вигляді [12]:

$$i_2 + i_{S,1} + i_{S,2} + \dots + i_{S,N} + i_r = 0 \quad (3.8)$$

Далі запишемо друге рівняння, але вже за допомогою другого закону Кірхгофа [12]:

$$u_2 = u_{S,1} = u_{S,2} = \dots = u_{S,N} = u_r = U_0 \quad (3.9)$$

Рівняння (3.8) потрібно продиференціювати за часом:

$$\frac{di_r}{dt} = \alpha_r^{\partial} (u_2 - R(i_r)i_r). \quad (3.10)$$

Не забуваємо також враховувати і рівняння трансформатора [12]

$$\frac{di_1}{dt} = A_{11}(u_1 - r_1 i_1) + A_{12}(u_2 - r_2 i_2) \quad (3.11)$$

$$\frac{di_2}{dt} = A_{21}(u_1 - r_1 i_1) + A_{22}(u_2 - r_2 i_2) \quad (3.12)$$

В кінцевому результаті розрахувавши вирази (3.8 – 3.12) в нас з'являється змога знайти невідому нам напругу вузла електричного навантаження [12]:

$$u_2 \equiv U_0 = \left(A_{22} + \sum_{k=1}^N A_{S,k} + \alpha_r^{\partial} \right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N [A_{S,k} r_{S,k} i_{S,k} - A_{SR,k} (-u_{R,k} - \Omega_k \psi_{R,k} - r_{R,k} i_{R,k})] - A_{21}(u_1 - r_1 i_1) + A_{22} r_2 i_2 + \alpha_r^{\partial} R(i_r) i_r \right). \quad (3.13)$$

З виразів (3.1 – 3.13) за допомогою фортрану ми можемо побудувати комп'ютерні симуляції для вузла навантаження без конденсаторної батареї і побачити наскільки є ефективною в плані роботи схема рисунку 3.1.

Виокремимо типи та параметрів основних елементів даного вузла. Можна використовувати силовий трансформатор для якого характерно таке: напруга первинних обмоток 6 кВ, а на вторинних 0,4 кВ; повна потужність для використаного нами трансформатора 160 кВА в нормальному режимі роботи, а при коротких замиканнях максимальна активна потужність, яку він витримує становить 3650 ват, такі параметри характерні для типу ТМ-160. Для масштабності експериментів ми візьмемо 40 асинхронних двигунів і всі одного виду – АО 51-4. Такі апарати обертаються зі швидкістю 1440 обертів на хвилину і за таких умов їх параметри будуть досягати таких номінальних значень: у випадку з напругою 380 кВ, струмом 9,4 А і потужністю 4,5 кВт.

Через відсутність у даному вузлі електричного навантаження компенсаційних пристроїв [6] відпадає сенс у проведенні декількох дослідів у зв'язку з тим, що вигляд рисунків 3.2 і 3.3 не буде змінюватися в графічному плані, а будуть тільки збільшуватися значення струму і напруги даного вузла

Якщо розглянути рисунки 3.2 і 3.3, то можна спостерігати щось подібне на сходинки, що призведе до зв'язку з тим, що кожен наступний асинхронний двигун вузла навантаження, який з'єднаний послідовно починає входити в усталений режим роботи. Беручи до уваги напруги на рисунку 3.3 можна одразу дійти висновків, що схема на рисунку 3.1 матиме великі значення спаду напруги в результаті пуску і початку роботи даного вузла, що з великою ймовірністю призведе до негативних наслідків, таких як виведення з ладу всієї системи [12].

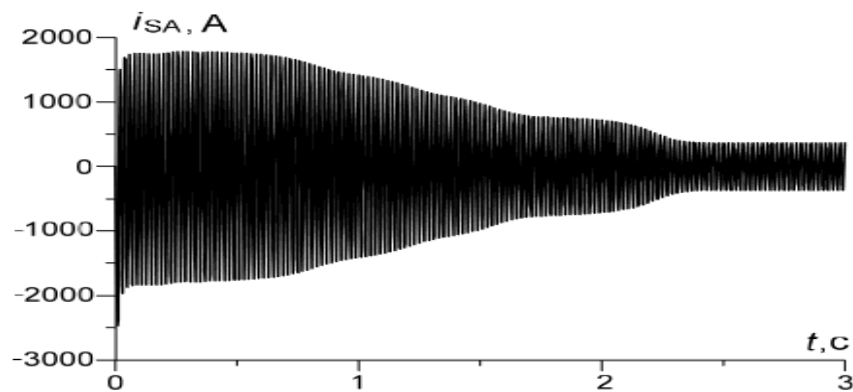


Рисунок 3.2 – Струми трансформатора для вторинних обмоток для першого дослідів

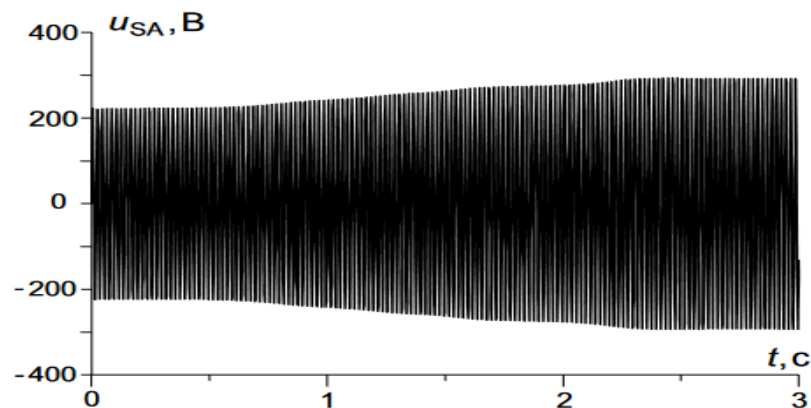


Рисунок 3.3 – Напруга, яка протікає у вузлі електричного навантаження під час першого дослідів

У зв'язку з цим, вузол навантаження, у якого відсутня компенсаційна батарея стає зовсім непотрібним у використанні, особливо це буде відноситися коли асинхронні двигуни вузла починають запускатися [12]. Тому схема рисунку 3.1 не буде спроможна виконувати свої задачі через надлишок реактивної потужності, яка протікатиме вузлом електричного навантаження. Через цю потужність постійно будуть виникати проблеми з стабілізацією напруги, яка буде завжди виходити за рамки допустимих норм і чим призводитиме до погіршення електроенергії, яку через вузол ми подаватимемо до робочого обладнання.

3.2 Вузол електричного навантаження з асинхронними приводами з конденсаторною батареєю.

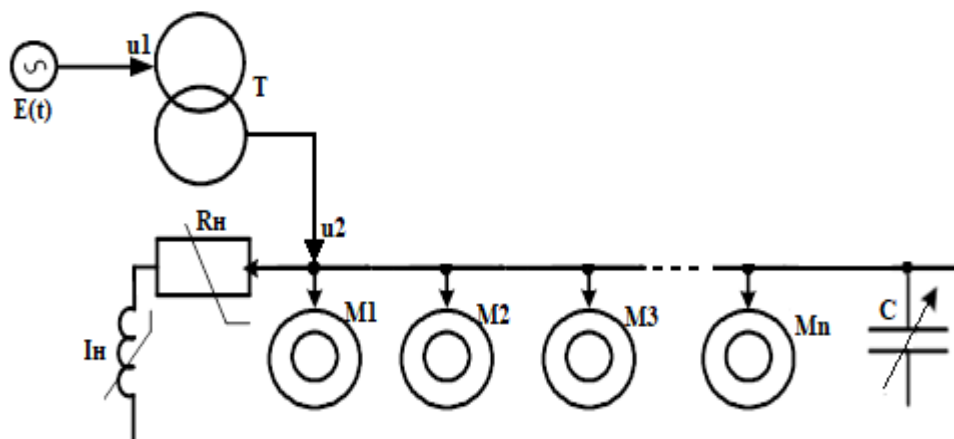


Рисунок 3.4 – Схема вузла навантаження, в якому використовується компенсаційний пристрій

Тепер звернемо увагу на вузол електричного навантаження [6], який дуже схожий на рисунок 3.1, але має одну відмінність у вигляді компенсаційної конденсаторної батареї, яку можна регулювати ємністю (рисунок 3.4).

Дану схему часто використовують у господарствах [11], які були малими, але через стрімкий розвиток почали розростатися і ставати більшими. Такі підприємства, як правило мають особисті міні-підстанції з понижувальним трансформаторами напруги, через це схема на рисунку 3.4 стає для них

ключовою при побудові такої підстанції. Головною проблемою для таких підприємств стає правильний вибір трансформатора як з практичної так і економічної сторони. Як у попередньому розділі економічна доцільність застаріла і практично призводить до неправильних розрахунків, щодо вибору трансформатора також нічого не змінено, використовують старі всім відомі табличні данні, які при такому використанні можуть на порядок відрізнятись від тих реальних даних, котрі використовуються підприємствами.

Згадана вище компенсаційна батарея може використовуватися не тільки для якогось одного процесу, а бути розділена на деяку кількість рівнів використання [12]. Як приклад конденсаторна батарея може використовуватися у випадках запуску асинхронних двигунів, також виконувати свою основну функцію – компенсувати реактивну потужність, нерідко батарея може використовуватися і при гальмівних процесах у асинхронних моторах.

Через подібність схем немає необхідності виводити більшість рівнянь попереднього пункту, тому ми можемо одразу перейти до основного розрахунку для рисунку 3.4 і отримати рівняння для конденсаторної батареї:

$$\frac{d Q_{Cj}}{dt C_j} = \frac{du_{Cj}}{dt} = \frac{1}{C_j} i_{Cj}, \quad j = A, B, C. \quad (3.14)$$

Для розрахунку напруги можна скористатися таким рівнянням

$$\frac{d}{dt} U_0 = -C^{-1} (i_2 + i_{S,1} + i_{S,2} + \dots + i_{S,N} + i_R) \quad (3.15)$$

У такому випадку можна застосувати і формули сили Ампера, які можна знайти для кожної фази статора і ротора асинхронного двигуна [12]:

$$F_{\Sigma A} = F_{AB} + F_{BA} + F_{AC} + F_{CA} + \frac{\sqrt{3}}{2} (F_{BC} + F_{CB}) \quad (3.16)$$

$$F_{\Sigma B} = F_{AB} + F_{BA} + F_{BC} + F_{CB} + \frac{\sqrt{3}}{2} (F_{AC} + F_{CA}) \quad (3.17)$$

$$F_{\Sigma C} = F_{BC} + F_{CB} + F_{AC} + F_{CA} + \frac{\sqrt{3}}{2} (F_{AB} + F_{BA}) \quad (3.18)$$

В даному випадку коли у вузлі електричного навантаження є конденсаторна батарея можна порівняти параметри у випадку, коли цю батарею можна регулювати змінюючи її значення ємності [12]. Наприклад використаємо такі значення: 100, 300, 10, 130 і це все буде в мікрофарадах. Потрібно зауважити, що трансформатор і 40 асинхронних двигунів ідентичні для даного вузла.

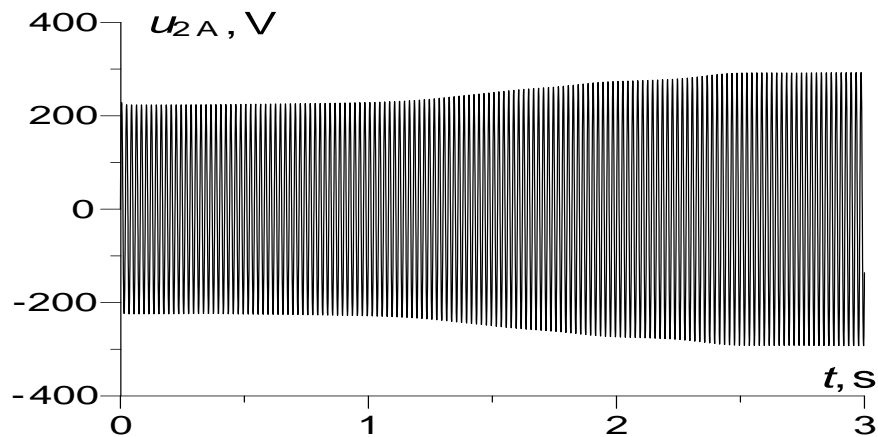


Рисунок 3.5 – Фазна напруга вузла навантаження з конденсаційною батареєю для першого дослідю

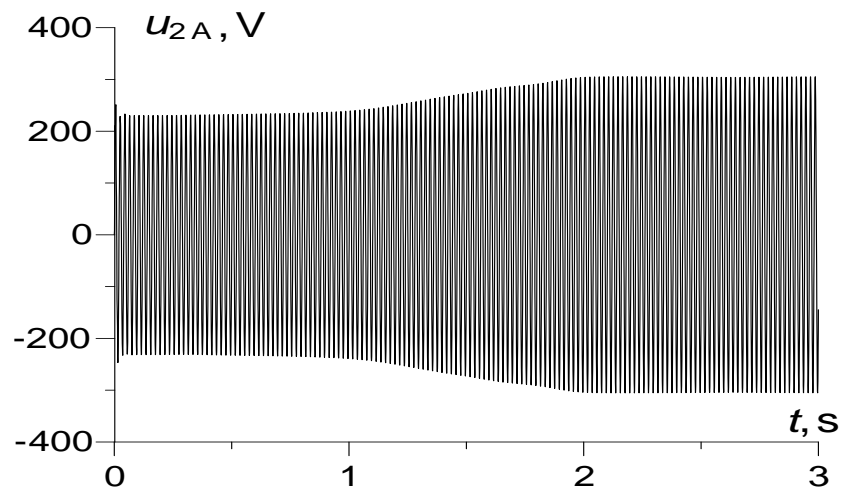


Рисунок 3.6 – Фазна напруга вузла навантаження з конденсаційною батареєю у випадку другого дослідю

Розглянувши рисунок 3.5 і 3.6 можна побачити, що результати другого дослідю достатньо будуть відрізнятися від результатів першого. Така відмінність лежить в збільшенні напруги, яка спричиняється зміною акумулятора, який має більші значення ємності [12]. Для наглядності напруга першого дослідю починає

працювати в усталеному режимі роботи при 275 вольтах, а для другого дана умова усталеності роботи починається тільки при 310 вольтах. Потрібно пам'ятати, що для лінійної напруги допустимі норми напруги знаходяться в проміжку від 361 до 399 вольт.

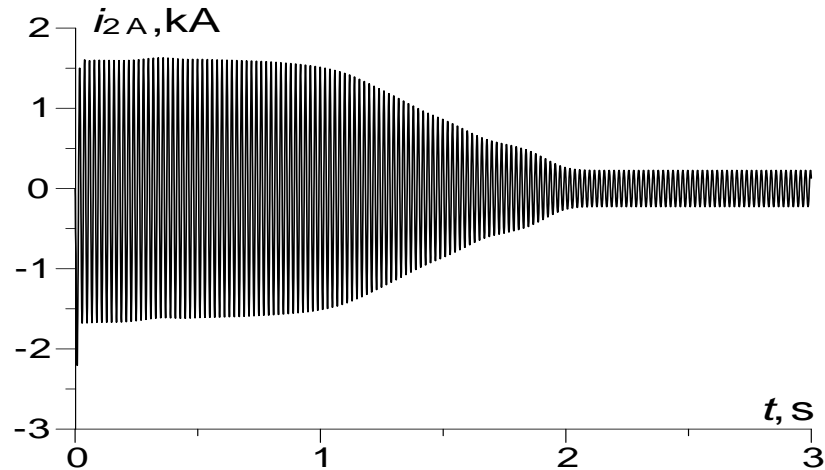


Рисунок 3.7 – Фазний струм вузла навантаження в шинах приводів з конденсаційною батареєю у випадку другого дослідів

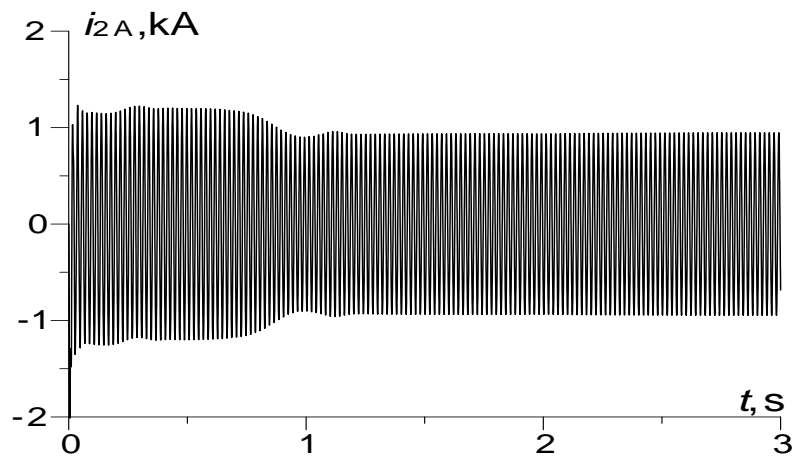


Рисунок 3.8 – Фазний струм вузла навантаження в шинах приводів з конденсаційною батареєю у випадку третього дослідів

На рисунках 3.7 і 3.8 ми провели зміни в значеннях ємності батареї [12], що призвело до досить значних змін струмів, які протікають вузловими шинами на початку дослідів вони становили 500 ампер, а тепер зросла аж до 1800 ампер. Такий приріст в струмах зумовлений тим, що струм протікає через трансформатор в саму конденсаторну батарею. Таким чином ми отримуємо одну

проблему у вигляді неефективної роботи вузла. Потрібно шукати і позитивну сторону таких рішень, а саме якщо подивитися на третій дослід можна побачити, що зі зміною ємності батареї покращуються значення пуску асинхронних двигунів [12]. На думку приходить ще один варіант, який може призвести до результатів, які будуть задовільняти параметри вузла і компенсації реактивної потужності – ним буде зміна кількості банок використаних для батареї.

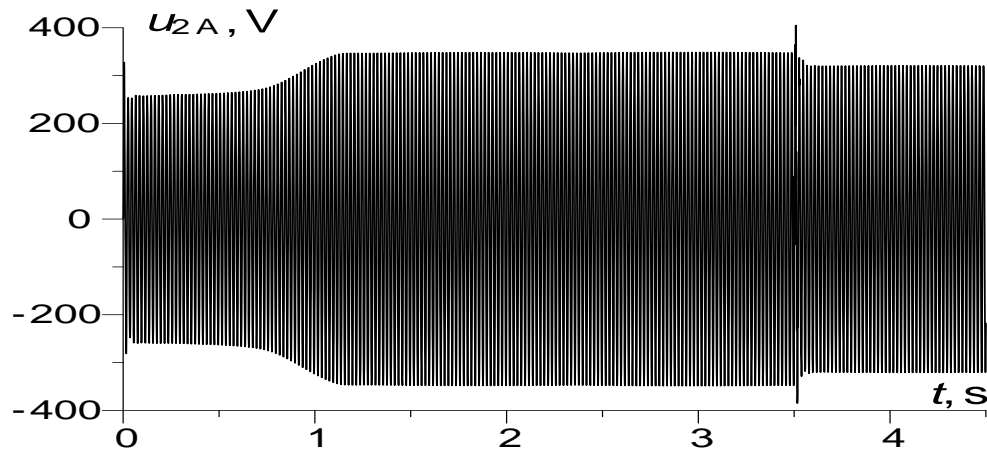


Рисунок 3.9 – Фазна напруга для четвертого дослід при змінні кількості банок конденсаторної батареї.

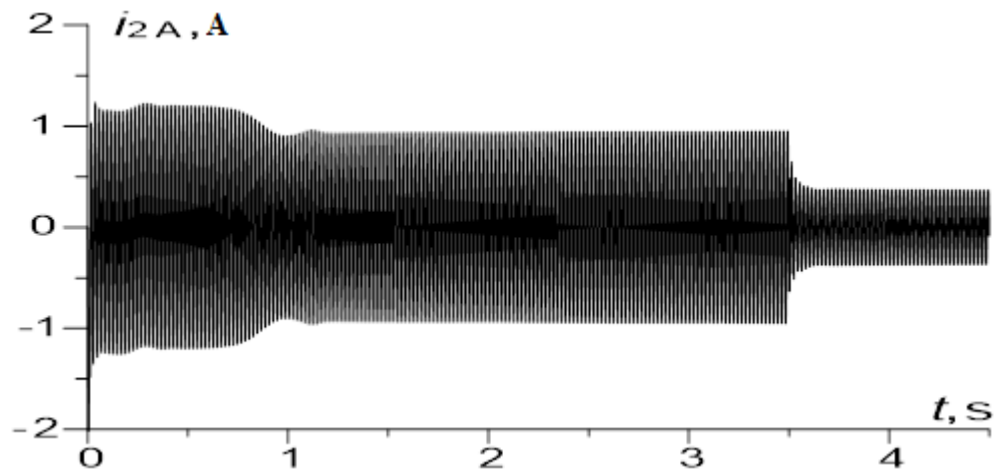


Рисунок 3.10 – Фазний струм у шинах пристрою для четвертого дослід при змінні кількості банок конденсаторної батареї.

Як результат з рисунків 3.9 і 3.10 ми отримуємо параметри фазної напруги і струму, які при пуску певної кількості двигунів будуть в допустимих значеннях, а при досягненні двигунами усталених режимів роботи отримати практично номінальні значення як для напруги так і для струму [12]. Провівши всього чотири досліді проводячи зміни в конденсаторній батареї ми знайшли

найкращий варіант для компенсації реактивної потужності і після якої значення будуть прямувати до номінальних.

3.3 Вузол електричного навантаження з синхронними приводами.

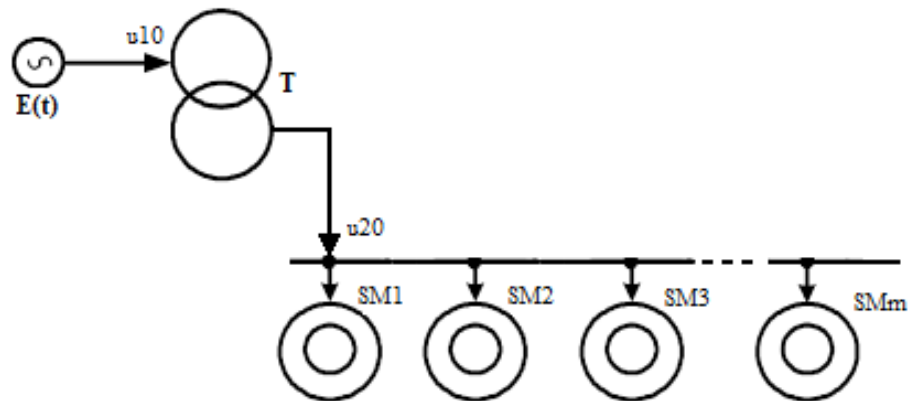


Рисунок 3.11 – Схема вузла електричного навантаження з синхронними приводами.

Як і в схемах асинхронних приводів так і для схем з синхронними приводами використовуються такі позначення:

$E(t)$ – джерело постійної потужності (електрорушійна сила),

T – трансформатор для пониження напруги,

$SM1, SM2, SM3, \dots, SMm$ – синхронні двигуни (m – певної кількості),

u_{10} та u_{20} – напруги на верхній та нижній стороні трансформатора.

Потрібно зазначити, що схема рисунку 3.1 і 3.11 з вигляду достатньо схожі, але у випадку з синхронними приводами відпадає будь-яка необхідність в компенсаційних пристроях. Можна подумати, що ми отримуватимемо такі ж результати як і при схемі вузла навантаження без компенсаційної батареї, але це хибні думки, тому що для компенсації реактивної потужності [11] будуть застосовані самі синхронні апарати. До кінця даного пункту ми пересвідчимось в тому, що даний вузол навантаження не потребуватиме ніяких додаткових елементів.

Для частоти експериментів використаємо таку ж кількість синхронних двигунів, але в нас виникає суттєва проблема у вигляді того, що потужність в

4,5 кВ не існує для синхронних приводів, тому у схемах будуть використовуватися АІР 100 С2 з номінальною потужністю, яка досягає 4 кВ і струмом в 8,2 ампера. Ми допускаємо, що вони нам підійдуть, але в економічній частині звернемо увагу на різницю в потужності і в вартості. На рахунок трансформатора все залишається незмінним.

Для початку сформуємо рівняння за якими буде обраховуватися даний вузол електричного навантаження [12]:

$$\frac{di_{10}}{dt} = A_{11,0}(u_{10} - r_{10}i_{10}) + A_{12,0}(u_{20} - r_{20}i_{20}) \quad (3.19)$$

$$\frac{di_{20}}{dt} = A_{21,0}(u_{10} - r_{10}i_{10}) + A_{22,0}(u_{20} - r_{20}i_{20}) \quad (3.20)$$

$$\frac{d\Psi_{S,k}}{dt} = V - r_{S,k}i_{S,k}, \quad \frac{d\Psi_{R,k}}{dt} = u_{R,k} - r_{R,k}i_{R,k} \quad (3.21)$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_{EM}}(M_{EM} - c_{1,2}(\gamma_1 - \gamma_2) - v_{1,2}(\omega_1 - \omega_2)) \quad (3.22)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_P}(c_{1,2}(\gamma_1 - \gamma_2) + v_{1,2}(\omega_1 - \omega_2) - M_P) \quad (3.23)$$

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{1}{L_{\Sigma,k}}(\rho_k g(H_{G,k} - S_{0,k}Q_k^2) - R_{\Sigma,k}Q_k) \quad (3.24)$$

Знайдемо також струм, який буде протікати обмотками кожного мотору за виразом [12]:

$$i_S = \alpha_S(\Psi_S - \psi_S), \quad i_R = \alpha_R(\Psi_R - B\psi_R), \quad \alpha_j = \frac{1}{L_j} \quad (3.25)$$

Тепер за виразами (3.19 – 3.25) ми можемо отримати комп'ютерні симуляції, які стосуються синхронних приводів [5].

Розглянувши рисунок 3.12 можна побачити момент коли машина починає працювати в усталеному режимі роботи і без компенсаційних пристроїв [12]. В синхронних машинах таких результатів добиваються за допомогою синхронізму. Для розуміння у випадку коли синхронна машина потрапляє в режим синхронізму відбувається компенсація реактивної потужності [11].

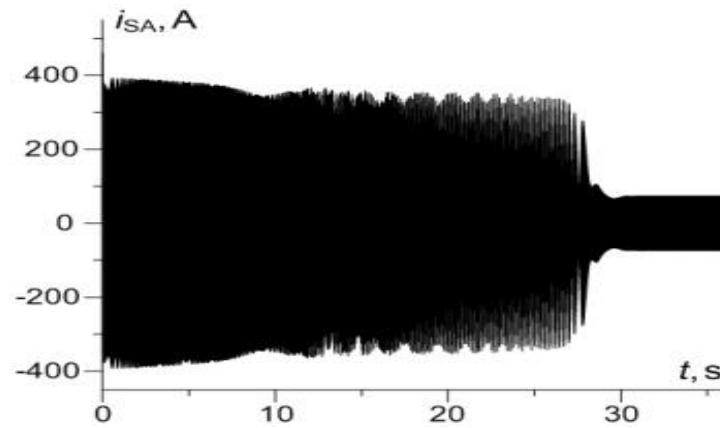


Рисунок 3.12 – Фазний струм обмотки ротора синхронного приводу

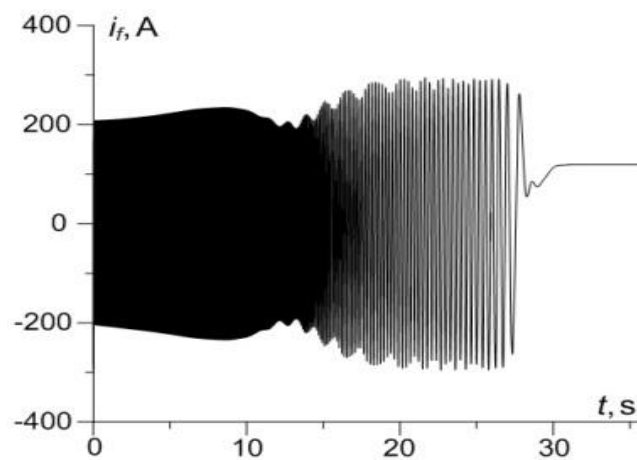


Рисунок 3.13 – Струм обмотки збудження для ротора синхронного приводу після синхронізму

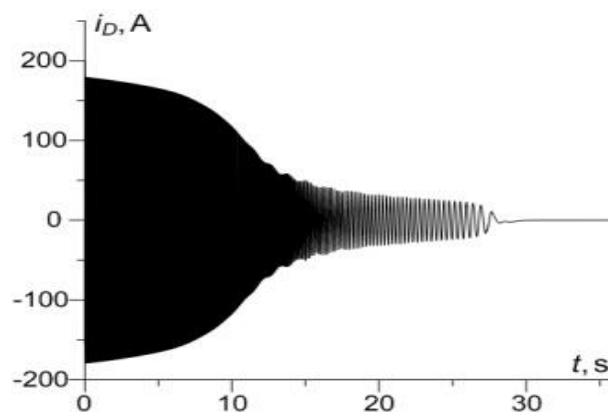


Рисунок 3.14 – Струм обмотки ротора синхронного приводу після синхронізму

Розглянувши рисунок 3.13 і 3.14 можна чітко побачити [12], що при стрімкому зростанні швидкості обертання ротора призводить до падіння частот струмів, це відноситься до обох рисунків. В момент коли ротор машини приводиться в режим синхронізму струми в обмотках прямують до нуля, а

струми збудження в свою чергу входять в сталий режим роботи. На рахунок напруги все також дуже просто, її значення після синхронізму становлять номінальні значення для вузла електричного навантаження.

Підсумовуючи даний пункт можна зазначити, що синхронні машини самостійно за допомогою синхронізму компенсують реактивну потужність чим спрощують схему вузла електричного навантаження, але є і свої мінуси таких машин. Для цього в наступному пункті ми порівняємо дані вузли детальніше і поспробуємо прийти рішення, який вузол є кращим для компенсації реактивної потужності.

3.4 Порівняльний аналіз роботи різних типів вузлів електричного навантаження з точки зору компенсації реактивної потужності

На підставі результатів комп'ютерної симуляції двох типів математичної моделі (електричний вузол навантаження з асинхронними проводами та електричний вузол навантаження з синхронними проводами) можемо зробити порівняльний аналіз останніх:

- 1) Вузол електричного навантаження з асинхронними проводами споживає значну кількість реактивної потужності. Це означає що напруга вузла електричного навантаження особливо під час пуску асинхронних проводів спадає більш як на 10 – 15% (у залежності від мережі). Це створює серйозну проблему для інших елементів вузла електричного навантаження.
- 2) Для вирішення заданої вище проблеми потрібно використовувати компенсувальні пристрої, у цій якості використовується компенсаційна конденсаторна батарея за з'єднання конденсаторних банок за послідовно-паралельною схемою, а самі фази з'єднуються або в трикутник, або в зірку.
- 3) Вмикання паралельно до вузла навантаження компенсаційної батареї побудує протікання струму. На перший погляд це може здатися

абсурдним рішенням, яке призводить до ще більшого струму у вузлі навантаження, а від так за законом Ома, ще більшого спаду напруги вузла навантаження. Насправді це не так, оскільки струм через батарею знаходиться у протифазі до струмів індуктивного характеру, а це значить, що в скалярному варіанті результуючий струм буде зменшуватися, а від так напруги вузла навантаження збільшуватися

- 4) Подальше збільшення ємності компенсаційної батареї призводить до ще більшого зростання напруги вузла, така процедура в електроенергетиці називається перекомпенсація. Це явище є не бажаним.
- 5) На противагу асинхронних проводів синхронні проводи не потребують впровадження у вузол електричного навантаження компенсаційної батареї
- 6) Конструкція синхронних моторів передбачає регулювання струмів збудження в роторі синхронної машини, тобто збільшує ефект намагнічення машини за допомогою ємнісних струмів. Це означає що у залежності від струму збудження синхронної машини, струм в якорі останньої може приймати такі форми:
 - I. Активно-індуктивна форма струму (машина в стані недозбудження);
 - II. Активна форма струму (машина збуджена нормально);
 - III. Активно-ємнісна форма струму (машина збуджена достатньо або перезбуджена).
- 7) Таким чином регулювання струмів збудження синхронних машин впливає на споживання або генерацію реактивної потужності вузлом електричного навантаження. В усталеному процесі ступінь регулювання здійснюють на підставі фау (V) характеристик синхронної машини.
- 8) На підставі пунктів 1 – 7 група інженерів може приймати рішення щодо доцільності типу вузла електричного навантаження. Під час цього рішення треба враховувати такі фактори:
 - I. забезпечення ефективного виконання задачі перед електроприводом;

II. можливість регулювання швидкості певними проводами, способів регулювання за допомогою моментів навантаження, тобто не змінюючи частоту;

III. вплив вузла електричного навантаження на мережу живлення;

IV. економічний чинник. Зазвичай синхронні машини у порівнянні з асинхронними є істотно дорожчими, також треба звернути увагу на вартість компенсаційної батареї особливо при високих напругах живлення асинхронних проводів (понад 6 кВ).

9) Синхронні електроприводи мають одну добру властивість, а саме швидкість обертання останніх не залежить від величини моменту навантаження на валі.

10) Таким чином за результатом порівняльного аналізу двох приводів важко віддати перевагу для конкретному типу електроприводу. Під час вибору приводного мотора електроприводу треба враховувати всі позиції, які були представлені у пунктах 1 – 9.

Даний порівняльний аналіз відіграє ключову роль в розумінні різниці між асинхронними та синхронними двигунами, а від цього будуть залежати способи компенсації реактивної потужності, залежно від їх використання. Три моделі в попередніх пунктах показали як вплине на роботу двигунів реактивна потужність. Можна довго розбиратися в недоліках перевагах кожного з двигунів, але потрібно розуміти одну серйозну відмінність: асинхронні двигуни потребують додаткових компенсуючих пристроїв для компенсації реактивної потужності, що одразу видно з комп'ютерних симуляцій для перших двох вузлів. Така залежність призводить до зменшення надійності системи в разі виведення з ладу батареї. Натомість синхронні двигуни самі спроможні компенсувати реактивну потужність, що в такому ключі робить їх використання у вузлах електричного навантаження більш доцільнішим і ефективнішим.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників у електроенергетиці.

Небезпечні і шкідливі чинники у електроенергетиці поділяють на певні групи [16], які можуть зустрічатися під час роботи, як зовні приміщення, так і в середині приміщення:

1. Фізичні небезпечні й шкідливі виробничі фактори у електроенергетиці [16]: підвищена чи знижена температура повітря робочої зони; машини, що рухаються, та механізми; рухомі частини виробничого устаткування; вироби, що пересуваються, заготівки, матеріали; конструкції, що руйнуються; гірські породи, що обрушуються; підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень вібрації; підвищений рівень інфразвукових коливань; підвищений рівень ультразвуку; підвищена чи знижена вологість повітря; підвищена чи знижена рухливість повітря; підвищена, чи знижена іонізація повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітних випромінювань; підвищена напруженість електричного поля; підвищена напруженість магнітного поля; відсутність чи недостача природного світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; підвищений рівень ультрафіолетової радіації; підвищений рівень інфрачервоної радіації; гострі краї, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів, устаткування; розташування робочого місця на значній висоті щодо поверхні землі (підлоги); підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися крізь тіло людини.

2. Хімічні небезпечні й шкідливі виробничі фактори [16].

Група підрозділяється на дві підгрупи:

2.1 за характером впливу на організм людини: загальнотоксичні (окис вуглецю, сірководень, метиловий спирт, сурикові фарби, етилований бензин та ін.); дратівні (хлор, аміак, скипидар, вапно та ін.); сенсibiliзуючі - діючі як

алергени (різні розчинники на основі нітросполук та ін.); канцерогенні - які викликають ракові захворювання (нікель і його з'єднання, окисли хрому, азбест, нафтові бітуми, кам'яновугільні смоли та ін.);

2.2 за шляхом проникнення в організм людини: через дихальні шляхи; через травний тракт; через шкіру.

3. Біологічні небезпечні й шкідливі виробничі фактори у електроенергетиці [16]. Ця група включає об'єкти, вплив яких викликає травми чи захворювання: мікроорганізми (бактерії, віруси, спірохети, гриби, найпростіші); макроорганізми (рослини, тварини).

4. Психофізичні небезпечні й шкідливі фактори [16]: фізичні перевантаження (статичні, динамічні, гіподинамічні); нервово-психічні перевантаження (розумове перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці та емоційні перевантаження)

Потрібно не забувати і про те що одним з найнебезпечніших факторів є ураження струмом у електроенергетиці, тому встановлено 5 класів захисту (0; 0I; I; II; III.) для запобігання небезпеки [16]:

До класу 0 відносять вироби, що мають принаймні робочу ізоляцію і не мають елементів для заземлення, якщо ці вироби не віднесені до класу II або III.

До класу 0I відносяться вироби, що мають принаймні робочу ізоляцію, елемент для заземлення та провід без заземлювальної жили для приєднання до джерела живлення.

До класу I відносяться вироби, що мають принаймні робочу ізоляцію і елемент для заземлення. У разі, якщо виріб I класу має провід для приєднання до джерела живлення, цей провід повинен мати заземлювальну жилу і вилку із заземлюючим контактом.

До класу II відносяться вироби, що мають подвійну або посилену ізоляцію і не мають елементів для заземлення.

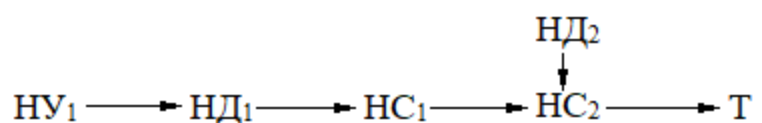
До класу III належать вироби, призначені для роботи при безпечній наднизькій напрузі, що не мають ні зовнішніх, ні внутрішніх електричних кіл, що працюють при іншій напрузі.

4.2 Обґрунтування процесів формування травмонебезпечних ситуацій

У зв'язку з низкою особливостей підрозділи електроенергетики сучасних виробництв характеризується значним впливом на працівників параметрів кліматичних і мікрокліматичних умов [16], позанормових впливів фізичних, біологічних, хімічних, психофізіологічних чинників, що з врахуванням сезонності виробництва, територіальності тощо досить часто спричинює виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій і відповідно травмування працівників [18]. За узагальненими статистичними даними, переважають причини організаційного характеру (60–70 %) (недотримання режимів праці, негативні зміни технологічних процесів, порушення вимог безпеки використання машин, механізмів, відсутність засобів індивідуального захисту тощо). Інші причини [18] – технічні (незадовільний технічний стан засобів виробництва, виробничих об'єктів, конструктивні недоліки, недостатня надійність засобів виробництва тощо) та психофізіологічні (стан здоров'я, алкогольне, токсикологічне отруєння та ін.) теж мають важливе значення.

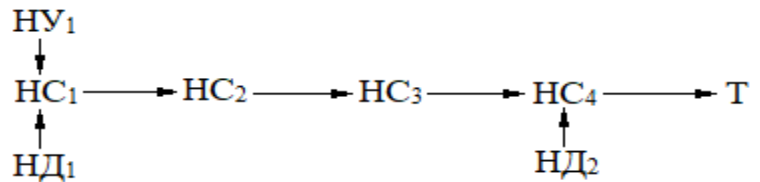
Вид робіт	Виробнича небезпека			Можливі наслідки	Засоби усунення
	небезпечна умова (НУ)	небезпечна дія (НД)	небезпечна ситуація (НС)		
Робота з електродвигунами	При ремонті двигунів несправна підставка НУ ₁	Використання підручних засобів НД ₁ перебування біля двигуна НД ₂	Падіння з підставки НС ₁ Падіння на робочого НС ₂	Травма	Проведення інструктажів з охорони праці та техніки безпеки

Модель процесу:



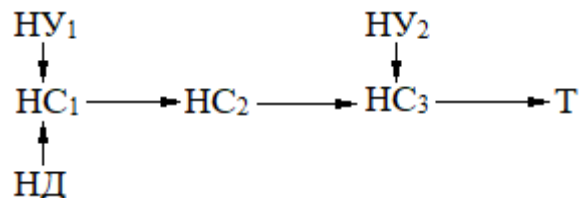
Робота на заточувальних верстатах	Зазор між підручником і кругом перевищують норму НУ ₁	Неправильно тримається деталь НД ₁ Знаходження в небезпечній зоні НД ₂	Круг захоплює деталь НС ₁ Її затягування НС ₂ Заклинення НС ₃ Розрив круга НС ₄	Травма	Постійний контроль стану верстатів.
-----------------------------------	--	---	--	--------	-------------------------------------

Модель процесу:



Підняття вантажу кран-балкою	Виведення з ладу обмежувача висоти НУ ₁ Перебування сторонніх людей НУ ₂	Несвоєчасна зупинка кран-балки НД	Вантаж вдарився в конструкцію НС ₁ Обірвався НС ₂ Впав на людей НС ₃	Травма	Постійний контроль стану машини. Не допускання до роботи під час виходу з ладу
------------------------------	---	-----------------------------------	---	--------	--

Модель процесу:



У результаті процесів формування і виникнення небезпечних ситуацій [18], як поєднання зазначених структурних складових, настають такі події: аварії (А), травми (Т), катастрофи, захворювання (З), а також виняток – результат без небезпечних чи шкідливих наслідків (ПС – сприятлива подія) або їх мінімальні рівні, якими теоретично можна знехтувати, а практично важливо зробити правильні висновки, детально проаналізувати схему і забезпечити недопущення її повторення у майбутньому.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під надзвичайною ситуацією [17] розуміють порушення нормальних умов життя і діяльності людей, об'єктів або територій унаслідок аварій, катастроф, стихійних лих або інших чинників, що спричинили або можуть спричинити загибель людей та значні матеріальні втрати.

За масштабами надзвичайні ситуації поділяють на [17]: загальнодержавного рівня; регіонального рівня; місцевого рівня; об'єктового рівня.

Залежно від причин виникнення, фізичної сутності та впливу на навколишнє середовище надзвичайні ситуації бувають природного, техногенного, соціально-політичного та воєнного характеру.

На території України джерелами таких надзвичайних ситуацій переважно бувають стихійні лиха, порушення технологічних процесів, вихід їх з під контроль людей тощо.

Це вимагає від владних структур усіх рівнів розробки та здійснення широкого комплексу заходів щодо реалізації державної політики у сфері забезпечення безпеки і захисту населення.

Ударною хвилею [17] називається область різкого стиску середовища, що поширюється у вигляді сферичного шару від місця вибуху з надзвуковою швидкістю. Ударні хвилі класифікуються в залежності від середовища поширення. Ударна хвиля в повітрі виникає за рахунок передачі стиснення і розширення шарів повітря. Зі збільшенням відстані від місця вибуху хвиля слабшає і перетворюється на звичайну акустичну. Хвиля при проходженні через дану точку простору викликає зміни в тиску, що характеризуються наявністю двох фаз: стиснення та розширення. Період стиснення настає відразу і триває порівняно невеликий час в порівнянні з періодом розширення. Руйнівна дія ударної хвилі характеризують надлишковий тиск у її фронті (передній межі), тиск швидкісного напору, тривалість фази стиснення

При надлишковому тиску 20-40 кПа незахищені люди можуть одержати легкі поразки (легкі забиті місця і контузії). Вплив ударної хвилі з надлишковим

тиском 40-60 кПа призводить до поразок середньої важкості: втраті свідомості, ушкодженню органів слуху, сильним вивихів кінцівок, кровотечі з носа і вух. Важкі травми виникають при надлишковому тиску понад 60 кПа. Вкрай важкі поразки спостерігаються при надлишковому тиску понад 100 кПа.

Ударна хвиля ядерного вибуху [17] може на значній відстані від центра вибуху завдавати поразки людям, руйнувати споруди і ушкоджувати бойову техніку. Ударна хвиля являє собою область сильного стиснення повітря, що розповсюджується з великою швидкістю у всі сторони від центра вибуху. Швидкість поширення її залежить від тиску повітря у фронті ударної хвилі; поблизу центра вибуху вона в декілька разів перевищує швидкість звуку, але із збільшенням відстані від місця вибуху різко падає. Вражаюча дія ударної хвилі на людей і руйнуючу дію на бойову техніку, інженерні споруди і матеріальні кошти передусім визначаються надмірним тиском і швидкістю рушення повітря в її фронті. Незахищені люди можуть, крім того поранитися осколками скла, що летять з величезною швидкістю і обломками будівель, що руйнуються, падаючими деревами, а також частинами бойової техніки, що розкидаються, камінням і іншими предметами, що приводяться в рушення швидкісним натиском ударної хвилі. Найбільші непрямі ураження будуть спостерігатися в населених пунктах і в лісі; в цих випадках втрати військ можуть виявитися більшими, ніж від безпосередньої дії ударної хвилі. Ударна хвиля здатна завдавати поразки і в закритих приміщеннях, проникаючи туди через щілини і отвори. Ураження, що наносяться ударною хвилею, поділяються на легкі, середні, важкі і надто важкі. Легкі поразки характеризуються тимчасовим пошкодженням органів слуху, загальною легкою контузією, ударами і вивихами кінцівок. Важкі поразки характеризуються сильною контузією всього організму; при цьому можуть спостерігатися пошкодження головного мозку і органів черевної порожнини, сильна кровотеча з носа і вух, важкі переломи і вивихи кінцівок. Міра ураження ударною хвилею залежить передусім від потужності і вигляду ядерного вибуху.

Механічний вплив ударної хвилі [17] оцінюється за ступенем руйнувань, викликаних дією хвилі (виділяються слабке, середнє, сильне і повне руйнування). Енергетичне, промислове і комунальне обладнання в результаті дії ударної хвилі може отримати пошкодження, також оцінюються за їх тяжкості (слабкі, середні і сильні). Вплив ударної хвилі може призвести також до пошкоджень транспортних засобів, гідровузлів, лісових масивів. Як правило, шкода, яка завдається впливом ударної хвилі, дуже великий, він наноситься як здоров'ю людей, так і різним спорудам, устаткуванню і т.д.

Середнє руйнування [17] проявляється в руйнуванні дахів і вбудованих елементів-внутрішніх перегородок, вікон, а також у виникненні тріщини у стінах, обвалення окремих ділянок горіщних перекриттів і стін верхніх поверхів. Підвали зберігаються. Після розчистки і ремонту може бути використана частина приміщень нижніх поверхів. Відновлення будівель можливо при проведенні капітального ремонту.

Сильне руйнування [17] характеризується руйнуванням несучих конструкцій і перекриттів верхніх поверхів, утворенням тріщин у стінах і деформацією перекриття нижніх поверхів. Використання приміщень стає неможливим, а ремонт і відновлення найчастіше недоцільним. Повне руйнування. Руйнуються всі основні елементи будівлі, включаючи і несучі конструкції. Використовувати будівлі неможливо. Підвальні приміщення при сильних та повних руйнування можуть зберігатися і після розбору завалів частково найкращий варіант для використання при таких ситуаціях.

Таким чином, обладнання, що використовується в цих приміщеннях є споживачем електроенергії, що живиться від змінного струму 220 В від мережі з заземленою нейтраллю, та відноситься до електроустановок до 1000 В закритого виконання. За способом захисту людини від ураження електричним струмом відповідає згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75* (2001).

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Розпочнемо з розрахунків вартостей вузлів електричного навантаження з використанням синхронних і асинхронних двигунів [13]. Перед цим потрібно нагадати, що ми використали по 40 однакових двигунів для двох вузлів, але різниця між ними в потужності відіграє на пряму на ціну. Зауважуємо, що вартість одного асинхронного двигуна при потужності в 4,5 кВ становить 6,9 тисяч гривень, а один синхронний двигун з меншою потужністю всього на 0,5 кВ (в 4 кВ) будуть оцінюватися в 6,6 тисяч гривень. З таких очевидних цін можна одразу зрозуміти, що якби синхронні двигуни випускалися на номінальну потужність в 4,5 кВ нам потрібно було б заплатити дорожче ніж за асинхронні.

З таких міркувань ми з легкістю знайдемо вартість 40 штук таким способом [19]:

$$C_{40Д} = m \cdot C_{1Д} \quad (5.1)$$

де m – кількість використаних у вузлі двигунів

$C_{1Д}$ – вартість одного синхронного або асинхронного двигуна

Вартість 40 асинхронних двигунів буде становити:

$$C_{40Д} = 40 \cdot 6,9 = 276 \text{ тис. грн.}$$

а вартість синхронних буде:

$$C_{40Д} = 40 \cdot 6,5 = 264 \text{ тис. грн.}$$

Підсумуємо перші отримані результати і можемо сказати, що синхронні двигуни будуть в рази дорожче коштувати ніж асинхронні. В різницю 0,5 кВ між ними, синхронні двигуни практично набули тої самої ціни, що й асинхронні двигуни.

Потрібно не забувати і про невід'ємний для вузла навантаження з асинхронними приводами елемент, а саме конденсаторну батарею [10]. В такому випадку нам потрібно розрахувати повну, активну і реактивну потужності, щоб зрозуміти на скільки може подорожчати вузол з асинхронними апаратами і

скільки потрібно часу, щоб конденсаторна батарея компенсуючи реактивну потужність окупила собівартість.

Для початку потрібно знайти різницю між повними потужностями до компенсації і після компенсації реактивної потужності. Для цього звернемося до комп'ютерних симуляцій 3 розділу, а також необхідно використовувати загальні формули для знаходження повної потужності [9]:

$$S = 3 \cdot \frac{U_{\phi}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\phi}}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

для розрахунків будуть використовуватися максимальні значення напруг і струмів:

- до компенсації реактивної потужності:

$$S = 3 \cdot \frac{250}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,3}{\sqrt{2}} = 110 \text{ кВА}$$

- після компенсації реактивної потужності батареєю:

$$S_B = 3 \cdot \frac{300}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,3}{\sqrt{2}} = 134 \text{ кВА}$$

Знайшовши повну потужність ми можемо сказати, що з батареєю після компенсації реактивної потужності ми отримуємо більші значення, які можна передавати системою.

Для подальших розрахунків вводимо значення косинусів: до компенсації батареєю 0,8, а після компенсації батареєю реактивної потужності значення покращуються до 0,92.

За таких умов ми можемо знайти активну потужність вузла електричного навантаження за стандартним виразом [10]:

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (5.3)$$

активна потужність до компенсації реактивної потужності:

$$P = 110 \cdot 0,8 = 88 \text{ кВт}$$

в цей самий час активна потужність після компенсації реактивної потужності:

$$P_B = 134 \cdot 0,92 = 123,3 \text{ кВт}$$

Підсумуємо результати після того як знайдемо значення реактивної потужності. Для цього нам необхідно знайти синус, який можна порахувати так:

$$\sin \varphi = \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi)} \quad (5.4)$$

значення синуса до компенсації реактивної потужності:

$$\sin \varphi = \sqrt{(1 - 0,8^2)} = 0,6$$

значення синуса після компенсації реактивної потужності батареєю:

$$\sin \varphi_B = \sqrt{(1 - 0,92^2)} = 0,4$$

Тепер знайдемо саму реактивну потужність і як вона зміниться [10]:

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (5.5)$$

реактивна потужність до компенсації:

$$Q = 110 \cdot 0,6 = 66 \text{ кВАр}$$

реактивна потужність після компенсації:

$$Q_B = 134 \cdot 0,4 = 53,6 \text{ кВАр}$$

Знайдемо реактивну потужність, яку компенсує батарея:

$$Q_K = Q - Q_B \quad (5.6)$$

$$Q_K = 66 - 53,6 = 12,4 \text{ кВАр}$$

Можна сказати, що з допомогою конденсаторної батареї ми отримуємо кращі значення не тільки номінальних значень струму, разом з цим напруги, а також і активної потужності, яка передається в систему. Щоб забезпечувати таку різницю ми застосовуємо конденсаторну батарею марки ЛПС-ДВ, яка забезпечує компенсацію реактивної потужності в 12,5 кВАр і ціна її на даний момент становить 2,1 тисячі гривень. Знаючи вартість реактивної потужності – 1,4 гривня за 1 кВАр/год ми можемо порахувати скільки часу необхідно для забезпечення собівартості [19]:

$$T_{ок} = C_B / C_T \quad (5.7)$$

$$T_{ок} = 2000 / 1,4 = 1428,6 / 24 \approx 60 \text{ днів}$$

Так, що конденсаторна батарея окупить себе всього через два місяці роботи.

ВИСНОВКИ

1) На підставі огляду допустимої нам літератури можна стверджувати, що компенсація реактивної потужності у вузлах електричного навантаження (особливо середньої та великої потужності) є проблема досить актуальна та потребує вирішення останнього на рівні прикладної електродинаміки із залученням апарата математичного моделювання динамічних систем із зосередженими і розподіленими параметрами.

2) Математичні моделі електротехнічних пристроїв, що входять у типові вузли електричного навантаження доцільно будувати виходячи із загальної теорії електричних, магнітних та електромагнітних кіл.

3) Згадана теорія описується системою звичайних нелінійних диференціальних рівнянь з урахуванням початкових умов до них.

4) Запропонована вище теорія дає можливість будувати математичні моделі вузлів електричного навантаження, до яких входять: силовий трансформатор, асинхронні та синхронні приводи, а також за необхідності додаткових компенсаційних пристроїв, наприклад компенсаційна конденсаторна батарея.

5) На підставі порівняльного аналізу математичних моделей можемо зробити висновок, що для чисельно-методної реалізації найбільш сприятливими є вузли електричного навантаження з асинхронними приводами та компенсаційною батареєю

6) На підставі результатів комп'ютерної симуляції, можемо стверджувати, що в плані компенсації реактивної потужності для енергетичних систем найбільш сприятливим є вузол електричного навантаження з синхронними проводами. Можливість регулювати напругу вузла електричного навантаження в номінальних діапазонах, однозначна перевага таких двигунів.

7) Потрібно розуміти, які затрати потрібні для будівництва вузлів електричного навантаження з синхронними двигунами і асинхронними двигунами, а у випадку останніх і термін окупності компенсаційних пристроїв.

8) Отримання повного розуміння всіх небезпечних чинників для здоров'я.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Аналітичний метод визначення умов повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, 2024. № 2 С. 75–80 .
2. Валентинов В. В. Проблема компенсації реактивної потужності в умовах навантаження, що динамічно змінюється. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2017. № 3 С. 199–205.
3. Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В. Сучасні системи компенсації реактивної потужності в міських електричних мережах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ, 2024. № 3. С. 43–46.
4. Yagup V., Yagup K., Kovalova Y., Kharchenko V., Besarab T., Krasnov O., Domanskii I., Domanskii V., Kostin H., & AbuGoukh H. G. Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, No. 8. P. 13–22.
5. Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2010. 608 с.
6. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці, Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2002. 300 с.
7. Малинівський А. А. Загальна електротехніка: навч. посіб. Львів: Нац. ун-т «Львівська Політехніка», 2001. 597 с.
8. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2009. 492с.
9. Сегеда М.І. Теоретичні основи електротехніки: навч. посіб. Тернопіль: Вища освіта, 2003. 350 с.

10. Погожих М. І., Пак А. О., Дьяков О. Г., Чеканов М. А. Електрообладнання енергетичних установок: навч посіб. / Харків: ФЛП Панов А. Н., 2019. 141 ст.
11. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. навч. посіб. Вінниця. Універсум, 2006. 236с .
12. Чабан А. В., Принцип Гамільтона-Остроградського в електротехнічних системах. Львів: В-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
13. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф. Електричні машини і апарати: навч. посіб. Київ: Аграрна освіта, 2013. 449 с.
14. Бурковський Ю. М., Косолапов С. М. Електричні машини: навч посіб. Київ: "Техніка", 2016. 352 с.
15. Чигаров А. І., Гончарук В. М., Рябошапка В. А. Електричні машини: підруч. Київ: Вища освіта, 2013. 108 с.
16. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Електробезпека: підруч. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.
17. Тимочко В. О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Безпека життєдіяльності та охорона праці: практикум. Львів : СПОЛОМ, 2022. 376 с.
18. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В. О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія). Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
19. Мірошник О. О., Черкашина В. В., Мороз О. М., Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків: ФЛП Панов А. Н., 2018. 214 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Формули метода Гамільтона-Остроградського , з яких виводилися формули для 3 пункту кваліфікаційної роботи

Рівняння для вузла електричного навантаження з асинхронними двигунами:

$$\begin{aligned}
\delta S = & \int_{t_1}^{t_2} \left\{ - \sum_{j=1}^3 \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial i_{1j}} \int_0^{i_{1j}} \psi_{1j} d_{1j} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{1j}} \int_0^t r_{1j} i_{1j}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{1j}} \int_0^t u_{1j} i_{1j} d\tau \right) \delta Q_{1j} + \right. \right. \\
& + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^{i_{2j}} \psi_{2j} d_{2j} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^t r_{2j} i_{2j}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^t u_{2j} i_{2j} d\tau \right) \delta Q_{2j} + \\
& \left. + \frac{d}{dt} \left(\int_0^{i_{rj}} \psi_{rj} d_{rj} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{rj}} \int_0^t R_{rj} (i_{rj}) i_{rj}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{rj}} \int_0^t u_{2j} i_{rj} d\tau \right) \delta Q_{rj} \right] - \\
& - \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 \left[\frac{d}{dt} \left(\psi_{Sj,k} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{Sj,k}} \int_0^t r_{S,k} i_{Sj,k}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{Sj,k}} \int_0^t u_{Sj,k} i_{Sj,k} d\tau \right) \delta Q_{Sj,k} + \right. \right. \\
& \left. + \frac{d}{dt} \left(\psi_{Rj,k} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{Rj,k}} \int_0^t r_{RLj,k} i_{Rj,k}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{Rj,k}} \int_0^t u_{Rj,k} i_{Rj,k} d\tau \right) \delta Q_{Rj,k} \right] + \frac{d}{dt} (J_{1,k} \omega_{1,k} + \\
& + \frac{v_{1,2,k}}{2} \frac{\partial}{\partial \omega_{1,k}} \int_0^t (\omega_{2,k} - \omega_{1,k})^2 \Big|_{t=\tau} d\tau \Big) \delta \gamma_{1,k} - \frac{\partial T_{E,k}^*}{\partial \gamma_{1,k}} \delta \gamma_{1,k} - c_{1,2,k} (\gamma_{2,k} - \gamma_{1,k}) \delta \gamma_{1,k} + \\
& + \frac{d}{dt} \left(J_{2,k} \omega_{2,k} - \frac{v_{1,2,k}}{2} \frac{\partial}{\partial \omega_{2,k}} \int_0^t (\omega_{1,k} - \omega_{2,k})^2 \Big|_{t=\tau} d\tau + \int_0^t \int_0^{\omega_{2,k}} M(\omega_{2,k}) d\omega_{2,k} d\tau \right) \delta \gamma_{2,k} - \\
& - c_{1,2,k} (\gamma_{1,k} - \gamma_{2,k}) \delta \gamma_{2,k} \Big\} dt + \sum_{j=1}^3 \left[\left(\psi_{1j} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{1j}} \int_0^t r_{1j} i_{1j}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{1j}} \int_0^t u_{1j} i_{1j} d\tau \right) \delta Q_1 + \right. \\
& \left. + \left(\frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^{i_{2j}} \psi_{2j} d_{2j} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^t r_{2j} i_{2j}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{2j}} \int_0^t u_{2j} i_{2j} d\tau \right) \delta Q_2 + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\int_0^{i_{rj}} \psi_{rj} di_{rj} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{rj}} \int_0^t R_j(i_{rj}) i_{rj}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{rj}} \int_0^t u_{2j} i_{rj} d\tau \right) \delta Q_{rj} \Bigg]_{t_1}^{t_2} + \\
& + \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 \left[\left(\psi_{Sj,k} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{Sj,k}} \int_0^t r_{S,k} i_{Sj,k}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{Sj,k}} \int_0^t u_{Sj,k} i_{Sj,k} d\tau \right) \delta Q_{Sj,k} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left(\psi_{Rj,k} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial i_{Rj,k}} \int_0^t r_{RL,k} i_{Rj,k}^2 d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{Rj,k}} \int_0^t u_{2j,k} i_{Rj,k} d\tau \right) \delta Q_{Rj,k} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left(J_{1,k} \omega_{1,k} - \frac{v_{1,2,k}}{2} \frac{\partial}{\partial \omega_{1,k}} \int_0^t (\omega_{2,k} - \omega_{1,k})_{|t=\tau}^2 d\tau \right) \delta \gamma_{1,k} + \left(J_{2,k} \omega_{2,k} - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{v_{1,2,k}}{2} \frac{\partial}{\partial \omega_{1,k}} \int_0^t (\omega_{2,k} - \omega_{1,k})_{|t=\tau}^2 d\tau + \int_0^t \int_0^{\omega_{2,k}} M(\omega_{2,k}) d\omega_{2,k} d\tau \right) \delta \gamma_{2,k} \right] \Bigg)_{t_1}^{t_2} = 0. \quad (1)
\end{aligned}$$

Рівняння для вузла електричного навантаження з синхронними двигунами:

$$\begin{aligned}
S = & \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \sum_{j=1}^3 \left[\int_0^{i_{1j}} \psi_{1j} di_{1j} + \int_0^{i_{2j}} \psi_{2j} di_{2j} + \int_0^{i_{rj}} \psi_{rj} di_{rj} \right] + \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 \left[\int_0^{i_{Sj,k}} \psi_{Sj,k} di_{Sj,k} + \int_0^{i_{Rj,k}} \psi_{Rj,k} di_{Rj,k} \right] + \right. \right. \\
& + \frac{J_{1,k} \omega_{1,k}^2}{2} + \frac{J_{2,k} \omega_{2,k}^2}{2} \Big) - \sum_{k=1}^N \frac{c_{1,2,k} (\gamma_{2,k} - \gamma_{1,k})^2}{2} + \sum_{j=1}^3 \frac{Q_{C,j}^2}{2C_j} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \int_0^t (r_{1j} i_{1j}^2 + r_{2j} i_{2j}^2) d\tau + \\
& + \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} \int_0^t (r_{Sj,k} i_{Sj,k}^2 + r_{RLj,j} i_{Rj,k}^2) d\tau + \int_0^t \frac{v_{1,2,k} (\omega_{2,k} - \omega_{1,k})^2}{2} d\tau \right) + \int_0^t R(i_r) i_r^2 d\tau - \\
& - \sum_{j=1}^3 \int_0^t (u_{1j} i_{1j} + u_{2j} i_{2j} - u_{2j} i_{rj}) d\tau - \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} \int_0^t (r_{Sj,k} i_{Sj,k}^2 + r_{RLj,j} i_{Rj,k}^2) d\tau + \right. \\
& \quad \left. + \int_0^t \int_0^{\omega_{2,k}} M(\omega_{2,k}) d\omega_{2,k} d\tau \right) \Bigg\} dt. \quad (2)
\end{aligned}$$