

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет ”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2021 р

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему « Аналіз методів практичних розрахунків нестационарних режимів»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКмз-19
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Рассказова В. С.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник доцент кафедри, к.т.н. Шеїна Г. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Рассказова Валерія Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз методів практичних розрахунків нестационарних режимів

керівник роботи к. т. н. Шеїна Г.О.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 30 травня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: _____

схема електричної мережі

головна схема електричної станції

схема електропостачання власних потреб блока

тип основного обладнання електричної станції

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

Розділ 1. Аналіз перехідних процесів електричних системах

Розділ 2. Математичний аналіз процесів в ЕЕС

Розділ 3. Визначення струмів короткого замикання

Розділ 4. Охорона праці

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

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Шейна Г.О.		
Розділ 4	Біла Н. С.		

7. Дата видачі завдання 01 березня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.03–30.03.21	
2.	Розділ 2	31.03–21.04.21	
3.	Розділ 3	22.04–19.05.21	
4.	Розділ 4	20.05–30.05.21	
5.			
6.			

Студент

(підпис)

Рассказова В. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Шейна Г. О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Рассказова В. С. Аналіз методів практичних розрахунків нестационарних режимів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі розглядаються фізичні явища, які виникають в ЕЕС системах при виникненні перехідних процесів.

У другому розділі розглядаються питання перехідних процесів синхронних машин без демпферних обмоток або з ними. Розглянуті диференціальні рівняння, які у повній мірі описують перехідні процеси. Вони враховують основні складові електромагнітного перехідного процесу в електричній машині, і ці рівняння визначають струм раптового трифазного КЗ. На векторних діаграмах проаналізовані складові струмів КЗ, їх залежність від попереднього режиму і характеру навантаження.

У третьому розділі досліджувалася електрична частина електричної станції, виконується розрахунок параметрів схем заміщення асинхронних двигунів власних потреб, визначаються експлуатаційні параметри двигунів, пускові характеристики. Створена математична модель електричної частини електростанції.

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

Ключові слова: перехідні процеси, синхронні машини, трифазне коротке замикання, векторна діаграма, електрична станція, асинхронні машини, власні потреби.

1. Аналіз режимів роботи електричної станції / Рассказова В.С., Кардаш Д.О., Шеїна Г.О.// III Міжнародна науково-технічна інтернет-конференції «Новітні технології в освіті, науці та виробництві». Покровськ. 2021.

ANNOTATION

Rasskazova Valeriia Serhiivna. Analysis of methods of practical calculations of nonstationary regimes / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 141 "Electricity, electrical engineering and electromechanics". – DonNTU, Pokrovsk, 2021.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions and a list of sources used.

The first section considers the physical phenomena that occur in EES systems in the event of transients.

The second section deals with the transients of synchronous machines without or with damping windings. Differential equations are considered, which fully describe the transients. They take into account the main components of the electromagnetic transient process in an electric machine, and these equations determine the current of a sudden three-phase short circuit. The components of short-circuit currents, their dependence on the previous mode and the nature of the load are analyzed on vector diagrams.

In the third section the electric part of the power plant is investigated, the calculation of parameters of schemes of replacement of asynchronous motors of own needs is carried out, operational parameters of motors, starting characteristics are defined. A mathematical model of the electrical part of the power plant is created.

In the fourth section the issues of labor protection are considered.

Keywords: transients, synchronous machines, three-phase short circuit, vector diagram, power plant, asynchronous machines, own needs

Analysis of power plant operation modes / Rasskazova V. S., Kardash D. O., Sheina G.O. // III International scientific and technical Internet conference "The latest technologies in education, science and production". Pokrovsk. 2021.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. Аналіз перехідних процесів електричних системах	8
Розділ 2. Математичний аналіз процесів в ЕЕС	10
2.1 Основні поняття	10
2.2 Аналіз процесів в електричній машині	21
2.3 Математичний аналіз процесів в синхронній машині	42
2.4 Практичні методи розрахунку	56
2.5 Висновки за другим розділом	59
Розділ 3. Визначення струмів короткого замикання	60
3.1 Характеристика мережі	60
3.2 Усталений режим	84
3.3 Сталий режим КЗ	88
Висновки за третім розділом	98
Розділ 4 Охорона праці	100
Висновки	103
Список використаної літератури	105

ВСТУП

Метою даної роботи є створення математичної моделі електричної частини електростанції з метою дослідження сталих та перехідних режимів роботи мережі. Отриману математичну модель можна використовувати для підвищення надійності функціонування такого важливого елементу енергосистеми, як електрична станція.

Крім того проаналізовані математичні моделі двигунів власних потреб, визначенні параметри їх схем заміщення, отримані пускові характеристики. За допомогою отриманих даних є можливість аналізувати процеси самозапуску двигунів власних потреб вище згаданих електричних станцій.

На сучасних електростанціях є велика потреба в надійних генераторах і двигунах. Ці машини забезпечують надійність, маневреність та безперебійність роботи електростанції. Вони забезпечують необхідний момент обертання, швидкість і потужність генерації. Дійсно, вони мають велике значення. Тому в класичній літературі [1-5] та нових дослідженнях [6-13], які регулярно публікуються, велика увага приділяється процесам аналізу режимів, розробці та удосконаленню математичних моделей електричних машин.

Історично склалося, що перший шлях до якого звернулися дослідники при вивченні процесів в електричних машин, це спрощення фізичної картини процесів при математичному моделюванні. Ці спрощення мали наслідком значні відмінності отриманих результатів від реальних.

З розвитком математичного апарату й розширенням можливостей технічної реалізації моделювання, дослідники отримали більші можливостей.

Нелінійність процесів, значна кількість взаємних зв'язків між об'єктами вже на створюють проблем. В наведеній роботі приведені приклади використання нових ресурсів для дослідження складних і важливих перехідних процесів в електричних машинах.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Електрична система (силові елементи: генератори G , трансформатори T , лінії електропередачі W , синхронні компенсатори GC) – це, як добре відомо, частина електроенергетичної системи (ЕЕС), що виробляє, перетворює, розподіляє та споживання електроенергії (ЕЕ). Крім того, вона включає пристрої регулювання.

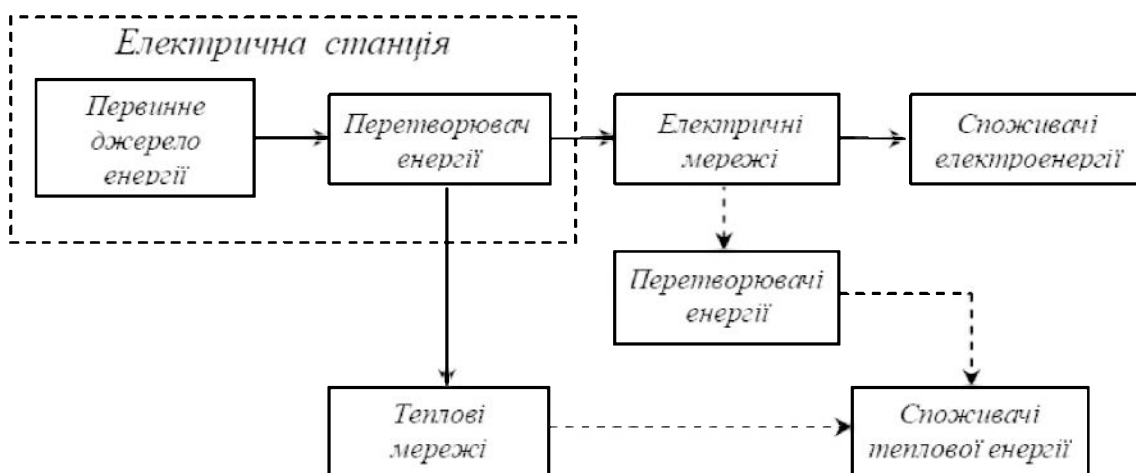


Рисунок 1.1 – Структура ЕЕС

Окремим підрозділом ЕЕС є система електропостачання (СЕР), основна функція якої розподіл електроенергії між вузлами навантаження.

Режим СЕР – це стан електричної системи, який кількісно характеризується деякими показниками, так званими параметрами режиму (U, I, f, s) .

При дослідженні параметрів режиму велику увагу приділяють розумінню фізичних явищ, що відбуваються при зміні режиму системи; вивчають методи кількісної оцінки перехідних процесів; досліджують заходи

і засоби управління цими процесами з метою надання їм необхідного характеру.

Режими поділяються за типом зміни їх параметрів:

- сталі, коли відбуваються повільні незначні зміни параметрів;
- перехідні, коли зміни є швидкими і значними.

Останні в свою чергу виникають у випадку, коли виникають короткі замикання; аварійно відключаються або включаються джерела чи споживачі; відбуваються процеси пуску та самозапуску; порушення симетричності роботи СЕП та інше.

Так само вони поділяються ще на два типи:

- ті, що характеризуються відсутністю зміни швидкості обертання генераторів, електромагнітні;
- ті, що характеризуються зміною швидкості обертання генераторів, електромеханічні.

В першому випадку, ми розглядаємо короткі замикання – замикання фаз або між собою, або на землю. Якщо опір в місці замикання відсутній, то таке КЗ називають металевим. Також виникає поздовжня несиметрія при обриві однієї або декількох фаз. На практиці можуть виникати й складні пошкодження, коли виникають одночасно декілька різних пошкоджень в різних точках електрично зв'язаних систем.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ЕЕС

2.1 Основні поняття

Найпростіша трифазна схема (рис. 2.1) – це коло із зосередженими параметрами, яке не включає трансформаторні зв'язки, й отримує живлення від джерела напруги нескінченної потужності.

Для джерела напруги нескінченної потужності повинні виконуватися наступні умови:

$$U_m = \text{const}$$

$$f = \text{const}$$

$$r_{\text{емер}} = 0$$

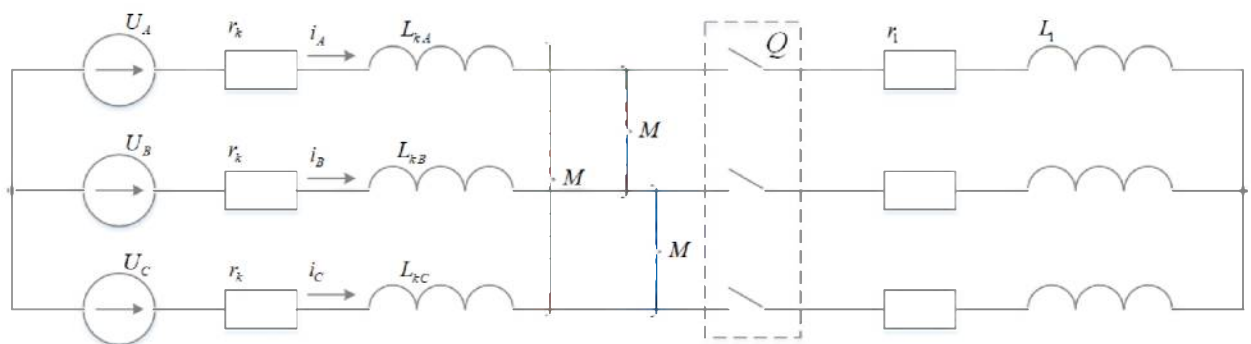


Рисунок 2.1 – Найпростіша схема

Фазна напруга має наступний закон зміни:

$$u_A = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

α – фаза включення.

Вимикач Q , за яким встановлена закоротка, після включення розділяє схему на два незалежних кола.

Визначимо закон зміни струмів у фазах.

Права частина включає короткозамкнені контури з параметрами r_1 , L_1 і описується рівнянням

$$0 = L_1 \cdot \frac{di}{dt} + r_1 \cdot i \quad (2.1)$$

Його рішення має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} i &= i_0 \cdot e^{-t/T_{a1}} \\ T_{a1} &= \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{\omega \cdot r_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

На практиці для визначення функції зміни струму при відсутності джерела енергії можна використати вбудовану функцію MatLab, яка має наступний синтаксис:

odeXY(Функція, Інтервал розрахунку, Початкові умови, Опції)

Функція:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F(t, X) \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &\dots \\ \frac{dx_m(t)}{dt} &= f_m(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \end{aligned} \right.$$

Інтервал розрахунку: $t \in [t_0, t_{end}]$.

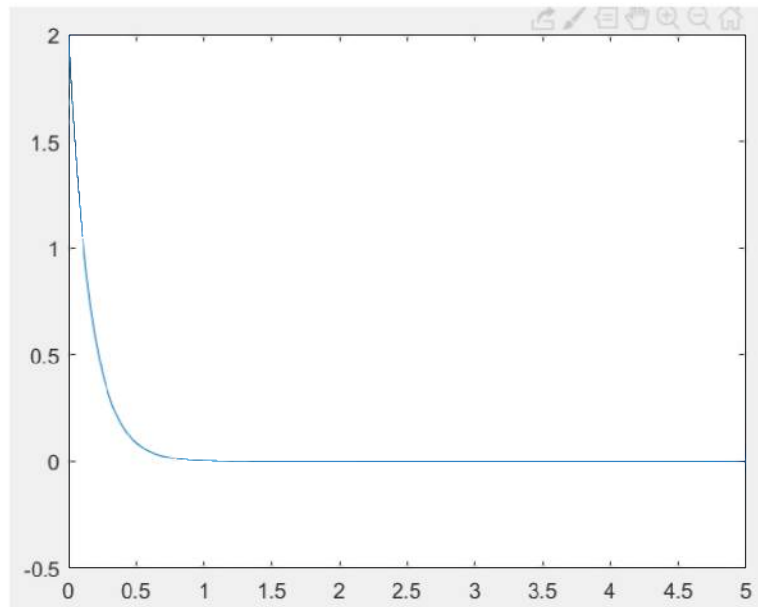
Початкові умови:

$$X(t_0) = X_0 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1(t_0) = x_{10} \\ x_2(t_0) = x_{20} \\ \dots \\ x_m(t_0) = x_{m0} \end{cases}$$

За наведеним вище алгоритмом визначено характер струму – рис.2.1.

```
r1=0.1; %активний опір
x1=5;   %індуктивний опір
L1=x1/(pi*100); %індуктивність
[t,i]=ode45(@(t,i) -r1/L1*i, [0 5], 2);% блок розв'язання ДР
plot(t,i) % побудова графіку зміни струму у часі
```

a



б

Рисунок 2.1 – Приклад визначення

З фізичної точки зору – цей характер зміни струму означає, що енергія магнітного поля, яка накопичена індуктивністю L_1 , витрачається на нагрів в активному опорі r_1 .

Збереження інерції магнітного потоку (правило Ленца) пояснює причину відсутності стрибка струму в індуктивності. Тому початкове значення струму визначається попереднім режимом.

Роздивимося ту частину схеми, яка залишилася підключеною до мережі:

$$u_A = i_A \cdot r + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \cdot \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \cdot \frac{di_C}{dt}$$

$$i_A = -(i_B + i_C)$$

Результуюча індуктивність буде складати: $L = L_A - (M_{AB} + M_{AC})$.

Таким чином, для кожної фази є справедливим твердження:

$$u = i \cdot r + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

До моменту КЗ, так званий, вихідний режим має наступний закон зміни:

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \frac{U_m}{\underline{Z}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) \\ \underline{Z} &= \sqrt{(r_k + r_1)^2 + (L_k + L_1)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Після моменту КЗ

$$\begin{aligned} i_{кз}(t) &= \frac{U_m}{\underline{Z}_k} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k) + C \cdot e^{-\frac{r_k}{L} t} = \\ &= \underbrace{I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k)}_{i_{пер}} + \underbrace{C \cdot e^{-\frac{r_k}{L} t}}_{i_{анер}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

В момент $t_{(0)^-}$

$$\left. \begin{aligned} t_{(0)^-} \\ i_{(0)^-} = i(t_{(0)^-}) = I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) \end{aligned} \right\}$$

В момент $t_{(0)^+}$

$$\left. \begin{aligned} t_{(0)^+} \\ i_{(0)^+} = i(t_{(0)^+}) = I_{mk} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) + C \end{aligned} \right\}$$

Так як для часу $t_{(0)^-} = t_{(0)^+}$ зберігається магнітний потік в індуктивності,

то

$$\left. \begin{aligned} i_{(0)^-} = i_{(0)^+} \\ I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) = I_{mk} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) + C \end{aligned} \right\}$$

Отже

$$C_{t=0} = I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{mk} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k)$$

Визначаємо складову струму для (2.5):

$$\left. \begin{aligned} i_{анер}(t) &= C \cdot e^{\frac{r_k}{L}t} = i_{анер0} \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} = \\ &= [I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{mk} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k)] \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} \\ i_{анер0} &= I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{mk} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) \\ T_a &= -\frac{L}{r_k} \end{aligned} \right\}$$

Вид навантаження і параметри електричної схеми визначають положення вектору струму $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ для режиму, що передусє КЗ $\varphi, \varphi + \frac{2\pi}{3}, \varphi - \frac{2\pi}{3}$.

Для нової електричної схеми, яка утвориться після КЗ, вектори періодичного струму $\underline{I}_{пер.а}, \underline{I}_{пер.б}, \underline{I}_{пер.с}$ визначаються кутами $\varphi_k, \varphi_k + \frac{2\pi}{3}, \varphi_k - \frac{2\pi}{3}$.

Аперіодичний струм в момент часу $t=0$ визначається геометричною різницею вектору струму попереднього режиму і періодичного струму КЗ:

$$i_{пер.а.(t=0)} = \underline{I}_a - \underline{I}_{пер.а}$$

$$i_{пер.б.(t=0)} = \underline{I}_b - \underline{I}_{пер.б}$$

$$i_{пер.с.(t=0)} = \underline{I}_c - \underline{I}_{пер.с}$$

Аперіодична складова залежить від фази включення. Її величина може приймати як максимальне (рис. 2.3, фаза a), так й мінімальне значення (рис. 2.4, фаза b).

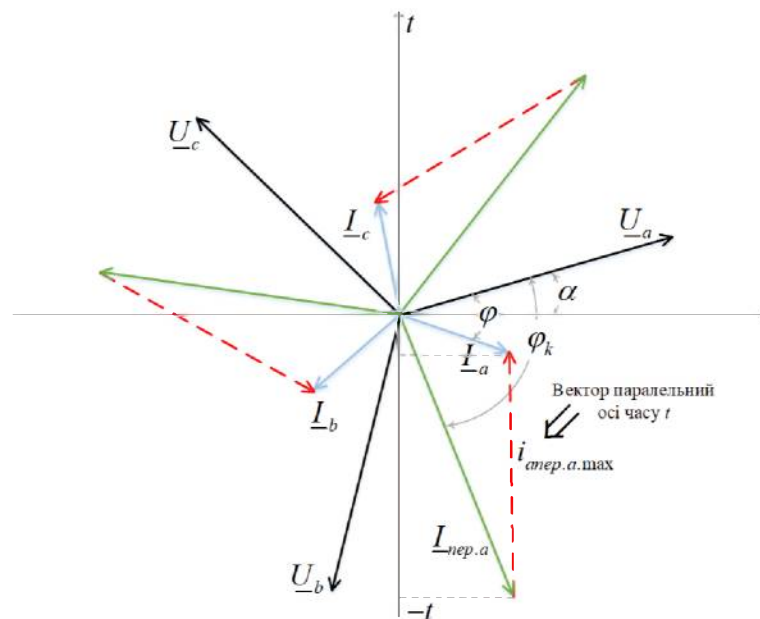


Рисунок 2.3 – Умова виникнення максимального аперіодичного струму

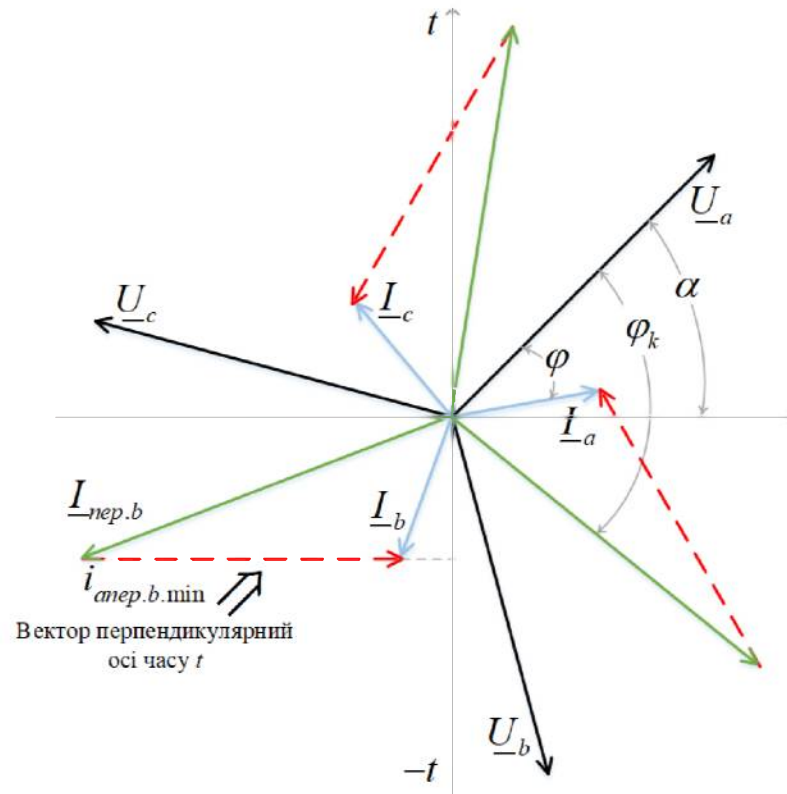


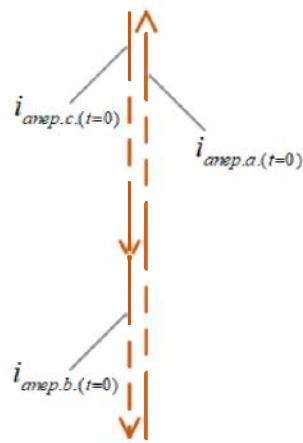
Рисунок 2.4 – Умова виникнення мінімального аперіодичного струму

Але такі окремі умови, як видно з рис. 2.3-2.4, можуть бути лише в одній фазі.

Ще одна властивість аперіодичних складових – це те, що у початковий момент виникнення КЗ – їх сума (аперіодичних складових трьох фаз) дорівнює нулю:

$$i_{\text{aper.a.}(t=0)} + i_{\text{aper.b.}(t=0)} + i_{\text{aper.c.}(t=0)} = 0$$

Графічно це підтверджується на рис. 2.2 і 2.5.

Рисунок 2.5 – Аперіодичні складові в момент часу $t = 0$

Крім того, значення аперіодичної складової визначається, що також добре видно з векторної діаграми (рис. 2.2), попереднім режимом електричної мережі.

Для активно-індуктивного навантаження, в особливій фазі, – це рис. 2.6, для активно-ємнісного навантаження – це рис. 2.7. В останньому випадку найбільша величина аперіодичного струму, але в електричних мережах такі випадки є рідкими, зустрічаються нечасто.

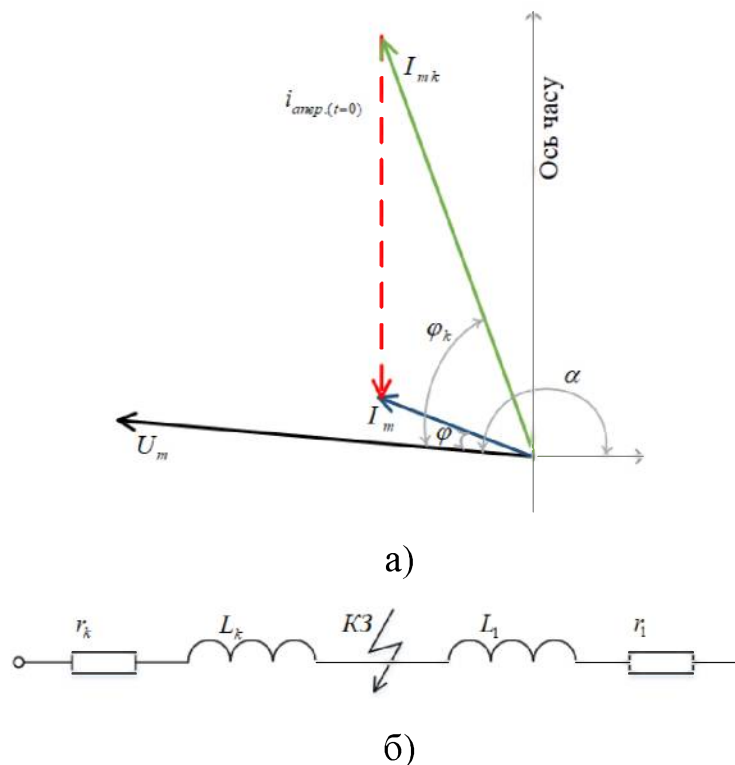


Рисунок 2.6 – Векторні діаграми для активно-індуктивного навантаження

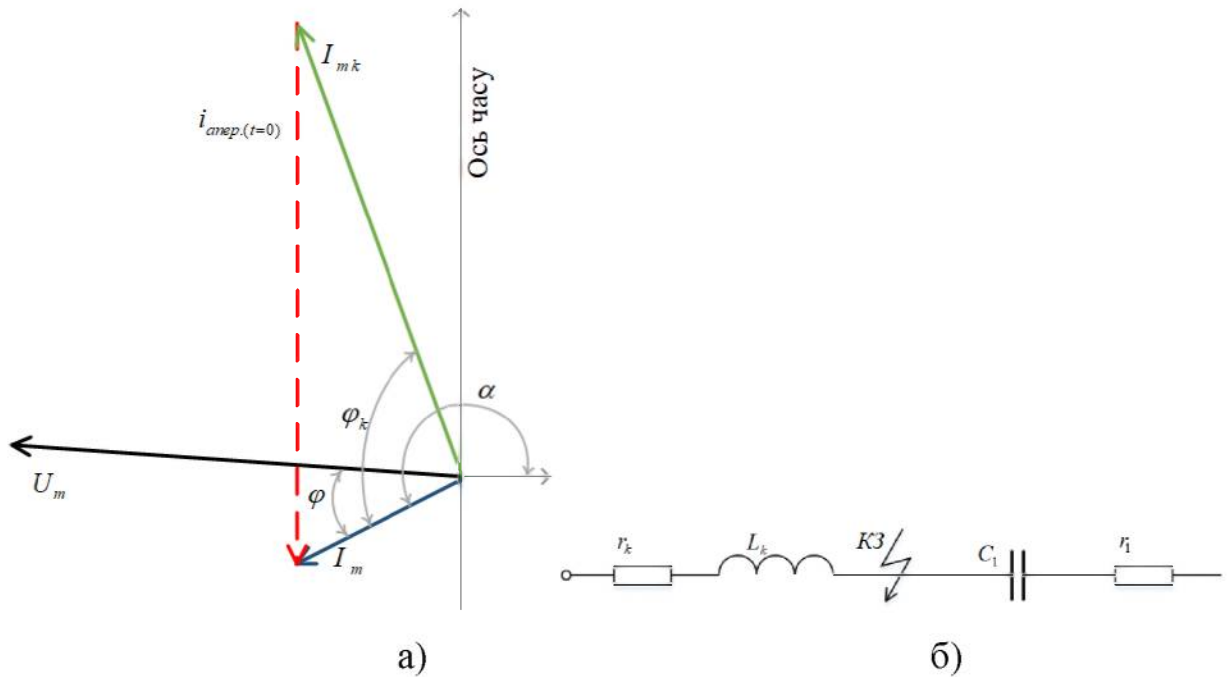


Рисунок 2.7 – Векторні діаграми для активно-ємнісного навантаження

На практиці можливий варіант короткого замикання з режиму холостого ходу, коли фаза включення α може бути в момент виникнення КЗ такою, що періодична складова струму КЗ I_{mk} проходить через максимум (рис. 2.8).

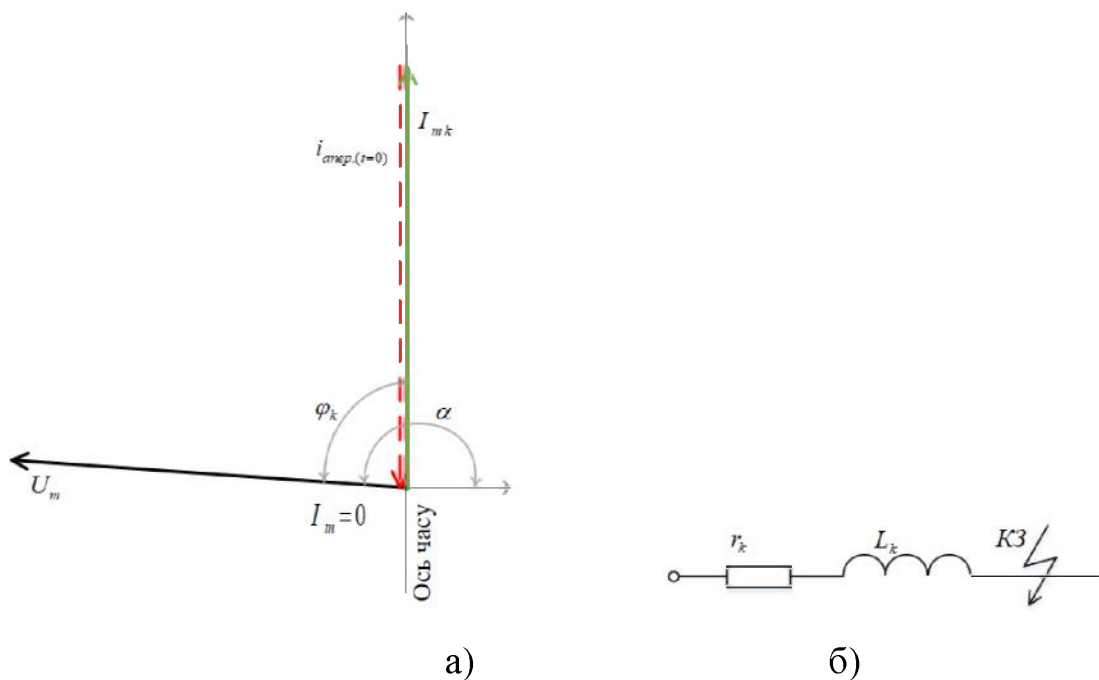


Рисунок 2.8 – Векторні діаграми для режиму ХХ

Аперіодична складова викривляє криву струму (рис. 2.9).

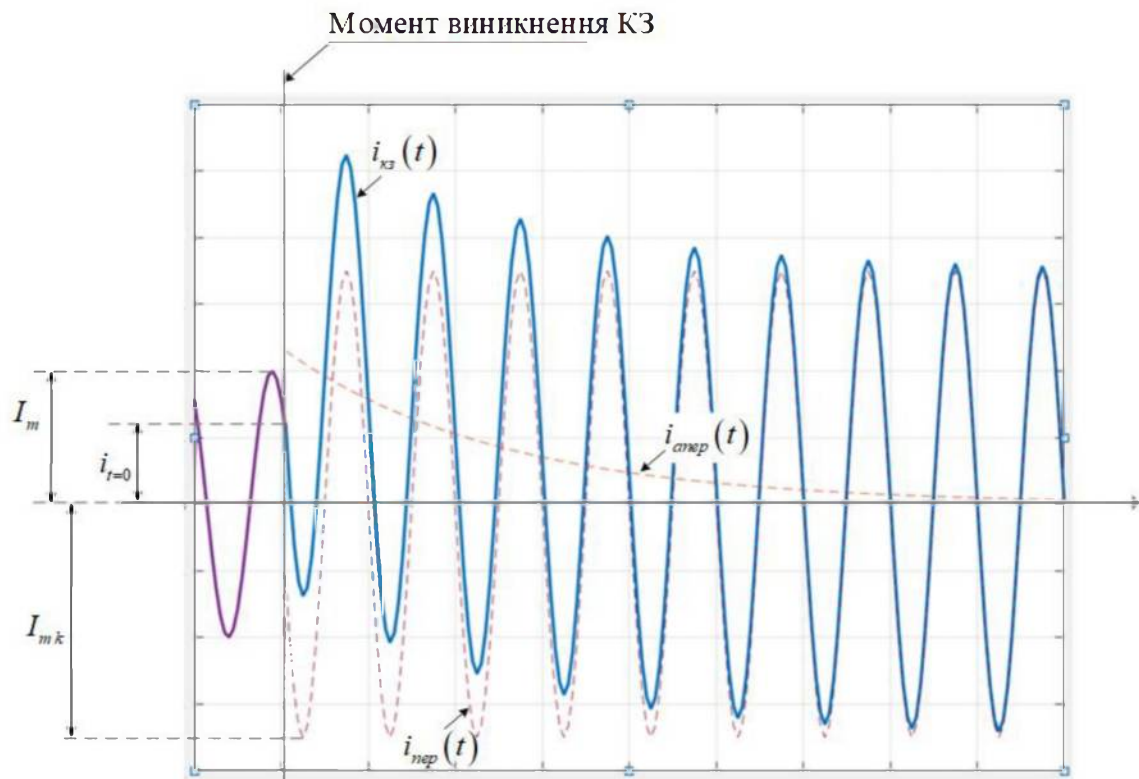


Рисунок 2.9 – Зміна у часі струму КЗ

Наведена на рис. 2.9 осцилограма дозволяє проаналізувати величину струмів КЗ.

Для умови, що в момент виникнення КЗ

$$i_{anep0} = I_{mk}$$

вираз (2.6) прийме вид

$$\left. \begin{aligned} i_{\gamma\delta} &= i_{kz}(0,01) = i_{nep}(0,01) + i_{anep}(0,01) \approx I_{mk} \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right) \\ k_{\gamma\delta} &= 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \end{aligned} \right\}$$

Так як величина постійної часу аперіодичної складової струму може приймати значення в діапазоні

$$\left. \begin{aligned} T_a &= \frac{L}{r} \\ r = 0 &\Rightarrow T_a = \infty \Rightarrow k_{y\phi} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} = 0 \\ L = 0 &\Rightarrow T_a = 0 \Rightarrow k_{y\phi} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} = 1 \end{aligned} \right\}$$

то й ударний коефіцієнт може прийняти значення в межах:

$$1 \leq k_{y\phi} \leq 2$$

Отже ударний струм виникає в момент часу 0,01 сек від початку КЗ.

Діюче значення струму КЗ:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 \cdot dt}$$

2.2 Аналіз процесів в електричній машині

Вводиться поняття "ідеалізованої машини" для чого приймаються додаткові припущення:

- не враховуються втрати в магнітній системі машини;
- приймається повна симетрія обмоток статора і ротора (рис. 2.10);
- враховується лише перша гармоніка кривих розподілу сили намагнічення й індукції в повітряному зазорі машини;

- всі демпферні обмотки за різними осями ротора і масив турбогенератора представляються однією еквівалентною за кожною віссю.

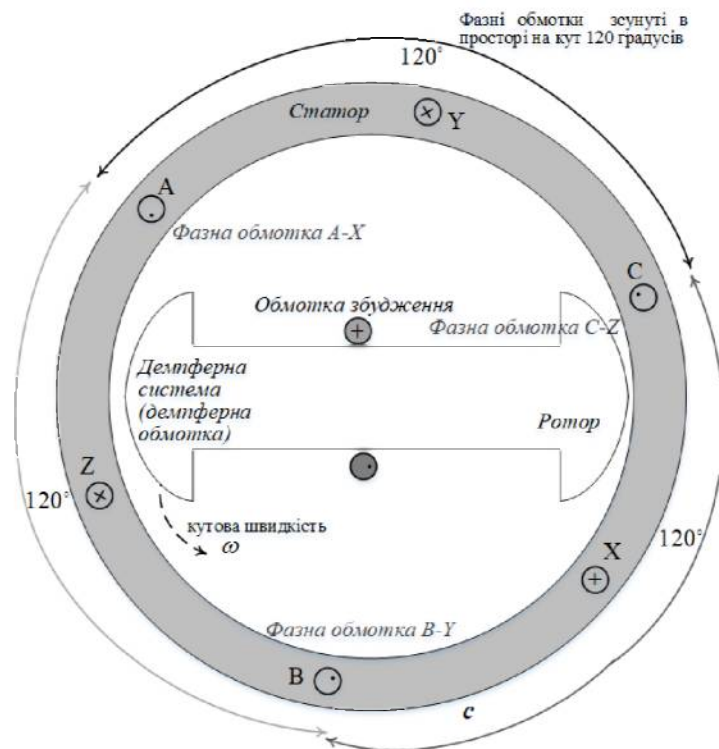


Рисунок 2.10 – Конструкція синхронної машини

Отже перше твердження, яке покладено в теорію дослідження режимів роботи електричних машин – це лінійна залежність між струмами i_a, i_b, i_c, i_f й потокозчепленнями $\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_f$ в контурах фаз та обмотки збудження: a, b, c, f :

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + M_{af} \cdot i_f \\ \psi_b &= M_{ba} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c + M_{bf} \cdot i_f \\ \psi_c &= M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c + M_{cf} \cdot i_f \\ \psi_f &= M_{fa} \cdot i_a + M_{fb} \cdot i_b + M_{fc} \cdot i_c + L_f \cdot i_f \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

У систему рівнянь (2.7) входять коефіцієнти самоіндукції L_a, L_b, L_c та взаємної індукції $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$.

Власна індуктивність контуру залежить від конструкції ротору (неявнополіусний чи явнополіусний):

$$L_a = l_0 + l_2 \cos(2\gamma) + l_4 \cos(4\gamma) + \dots$$

γ – кут повороту поздовжньої осі ротору відносно магнітної осі фази a .

Внаслідок симетрії фазних обмоток (рис. 2.11) коефіцієнти будуть однаковими для кожної фази:

$$L_a = l_0 + l_2 \cos(2\gamma) + l_4 \cos(4\gamma) + \dots$$

$$L_b = l_0 + l_2 \cos\left(2\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right]\right) + l_4 \cos\left(4\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right]\right) + \dots$$

$$L_c = l_0 + l_2 \cos\left(2\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right]\right) + l_4 \cos\left(4\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right]\right) + \dots$$

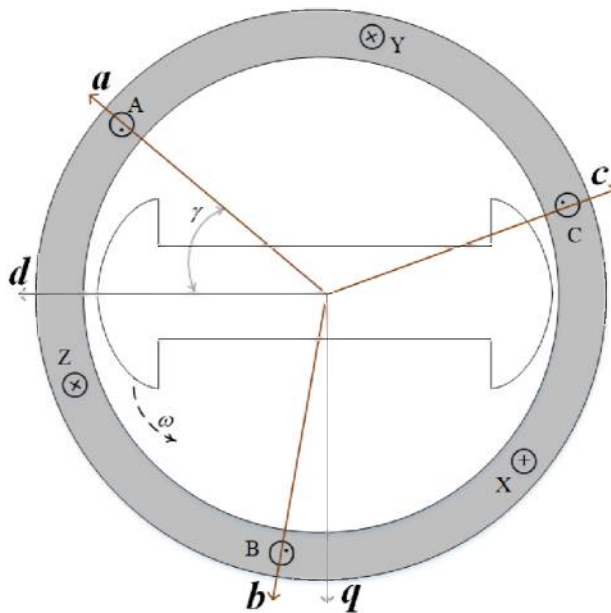


Рисунок 2.11 – Взаємне розташування обмоток та осей

Як доведено, для ідеалізованої електричної машини є справедливим спрощення:

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma) \\ L_b &= l_0 + l_2 \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c &= l_0 + l_2 \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Далі є логічним перейти до осей симетрії ротора. Якщо позначити індуктивності по поздовжній та поперечній осям, відповідно, наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} l_d &= l_0 + l_2 \\ l_q &= l_0 - l_2 \end{aligned} \right\}$$

то отримуємо наступну систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_d \cdot \cos^2(\gamma) + l_q \cdot \sin^2(\gamma) \\ L_b &= l_d \cdot \cos^2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + l_q \cdot \sin^2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c &= l_d \cdot \cos^2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + l_q \cdot \sin^2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Отже за аналогічним алгоритмом знаходимо взаємну індуктивність:

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= m_0 + m_2 \cos(2\gamma') + m_4 \cos(4\gamma') + \dots \\ \gamma' &= \gamma - 0,5 \cdot \frac{2\pi}{3} \end{aligned} \right\}$$

Вона приймає наступний вигляд:

$$M_{ab} = m_0 + m_2 \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Потім можна виконати, так само, перехід до більш зручної системи координат:

$$\left. \begin{aligned} m_d &= m_0 - \frac{1}{2} m_2 \\ m_q &= m_0 + \frac{1}{2} m_2 \\ M_{ab} &= \frac{m_d + m_q}{2} - (m_d - m_q) \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Отриманий вираз можна спростити:

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= -2 \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ M_{bc} &= -2 \left[m_d \cdot \cos\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \cos\left(\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + m_q \cdot \sin\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \sin\left(\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ M_{ac} &= -2 \left[m_d \cdot \cos\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \cos\left(\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + m_q \cdot \sin\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \sin\left(\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \right\}$$

Наступними розглядаються параметри обмотки збудження. Фазні обмотки нерухомі, а контур обмотки збудження обертається разом з ротором, тому взаємні індуктивності будуть мати період 2π :

$$M_{af} = M_{fa}, M_{bf} = M_{fb}, M_{cf} = M_{fc} \quad (2.8)$$

Через періодичність функції π взаємна індуктивність буде включати лише непарні гармоніки:

$$M_{af} = m_1 \cos(\gamma) + m_3 \cos(3\gamma) + \dots$$

При розімкнених затискачах фази a (XX) і наявності первинного потоку в обмотці збудження, справедливо твердження:

$$u_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_f \frac{dM_{af}}{dt} = i_f \cdot \gamma \cdot (m_1 \cdot \sin(\gamma) + 3m_3 \cdot \sin(3\gamma) + \dots)$$

Для умови синусоїдальності напруги можна спростити вираз (2.8)

$$\left. \begin{aligned} M_{af} &= m_1 \cos(\gamma) \\ M_{bf} &= m_1 \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} &= m_1 \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

За умови рівномірного завантаження контурів обмоток статора ($i_a = i_b = i_c$) ми отримуємо вираз для потокозчеплення:

$$\begin{aligned}
\Psi_a &= i \cdot (L_a + M_{ab} + M_{ac}) = \\
&= i \cdot \left(l_d \cdot \cos^2(\gamma) + l_q \cdot \sin^2(\gamma) - 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + m_q \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + m_d \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + m_q \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right) = \\
&= i \cdot \left[(l_d + 2m_d) \cdot \cos^2(\gamma) + (l_d + 2m_d) \cdot \sin^2(\gamma) \right]
\end{aligned}$$

Наведений вище вираз ґрунтується для використання загальновідомої теорії лінійних перетворень:

$$\left. \begin{aligned}
i_0 &= \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c) \\
i_d &= \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\
i_q &= \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right)
\end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Обернене перетворення має вид:

$$\left. \begin{aligned}
i_a &= i_0 + i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma) \\
i_b &= i_0 + i_d \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\
i_c &= i_0 + i_d \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

В окремому випадку, коли навантаження за фазами обмотки статора є симетричними і виконується умова $i_a + i_b + i_c = 0$, то є справедливими рівності:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i \cdot \cos(\alpha) \\ i_b &= i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

В рівнянні (2.11) складова $\underline{i}$ є змінним за величиною і напрямом узагальненим вектором струму (рис. 2.12).

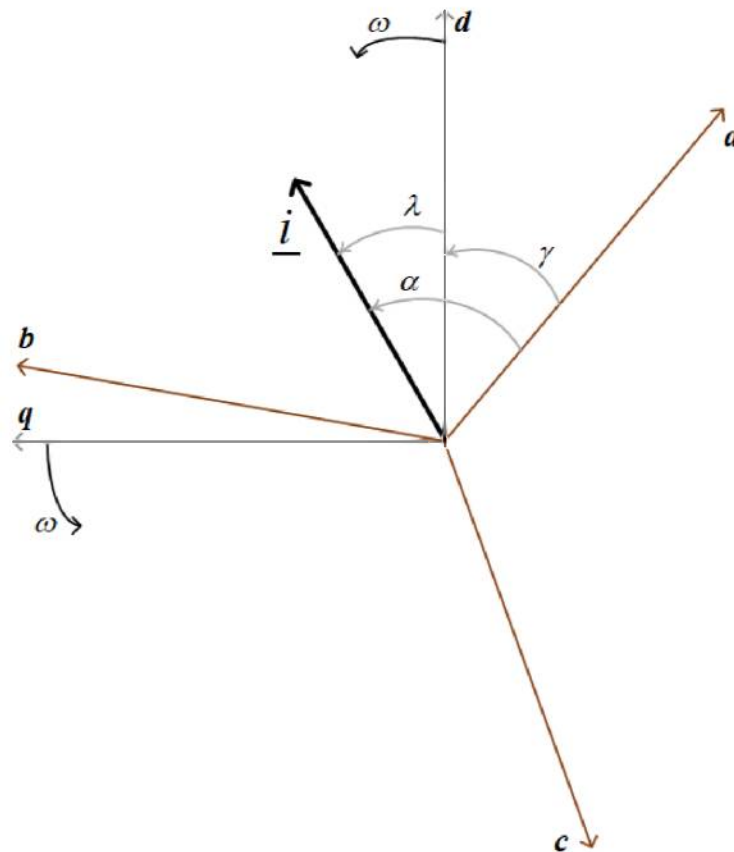


Рисунок 2.12 – Узагальнений вектор струму

На рис. 2.13 графічно пояснюються формули переходу.

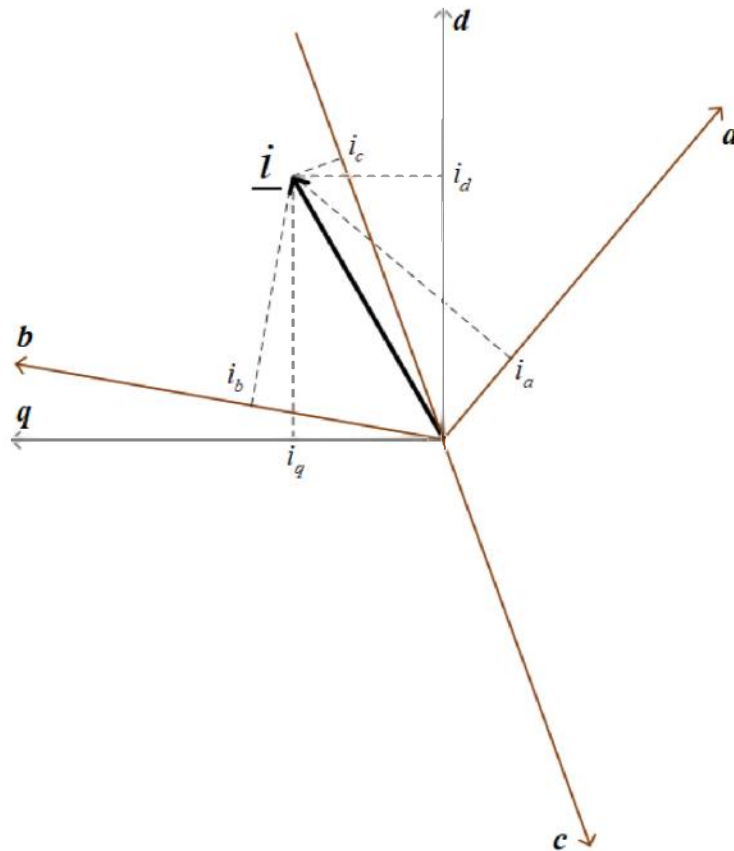


Рисунок 2.13 – Графічний зв'язок систем координат

Для умови $\underline{i}_a + \underline{i}_b + \underline{i}_c = 0$ справедливою є рівність:

$$\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) = 0$$

Таким чином

$$\begin{aligned} i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 &= [i \cdot \cos(\alpha)]^2 + \left[i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 + \left[i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 = \\ &= i^2 \cdot \left[\cos^2(\alpha) + \cos^2\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \frac{3}{2} \cdot i^2 \end{aligned}$$

Отже

$$i = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)} \quad (2.12)$$

$$\cos \alpha = \frac{i_a}{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}}$$

Якщо ввести позначення $\lambda = \alpha - \gamma$, то

$$\begin{aligned} i \cdot \cos(\lambda) &= i \cdot \cos(\alpha - \gamma) = \\ &= \frac{2}{3} \cdot i \cdot \left[\cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_d \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} -i \cdot \sin(\lambda) &= i \cdot \sin(\gamma - \alpha) = \\ &= \frac{2}{3} \cdot i \cdot \left[\sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_q \end{aligned} \quad (2.14)$$

З іншого боку, фазні струми можуть визначатися за допомогою обернених перетворень:

$$\begin{aligned}
i_a &= i \cdot \cos(\alpha) = i \cdot \cos(\gamma + \lambda) = \\
&= i \cdot (\cos(\gamma) \cdot \cos(\lambda) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\lambda)) = \\
&= i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
i_b &= i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\
i_c &= i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned}$$

Для умови $i_a + i_b + i_c \neq 0$

$$i_0 = \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c)$$

Таким чином

$$\begin{aligned}
i'_a &= i_a - i_0 \\
i'_b &= i_b - i_0 \\
i'_c &= i_c - i_0
\end{aligned}$$

і звідси ж

$$i'_a + i'_b + i'_c = 0$$

Тобто при не виконанні умов симетричності, можна так само скористатися наведеними вище формулами переходу

$$\begin{aligned}
i' \cdot \cos(\lambda') &= i' \cdot \cos(\gamma - \alpha') = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left[i'_a \cdot \cos(\gamma) + i'_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i'_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_d \\
\\
-i' \cdot \sin(\lambda') &= i' \cdot \sin(\gamma - \alpha') = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left[i'_a \cdot \sin(\gamma) + i'_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i'_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_q
\end{aligned}$$

Наведені нижче перетворення допомагають зв'язати фазні струми з додатковими величинами:

$$\begin{aligned}
i_a &= i_0 + i' \cdot \cos(\gamma + \lambda) \\
i_b &= i_0 + i' \cdot \cos\left(\gamma + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right) \\
i_c &= i_0 + i' \cdot \cos\left(\gamma + \lambda + \frac{2\pi}{3}\right) \\
i_0 &= \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\
i' &= \frac{2}{3} \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 - i_a \cdot i_b - i_b \cdot i_c - i_c \cdot i_a} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\
\lambda &= -\arctg \frac{i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)}{i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)} = -\arctg \frac{i_q}{i_d}
\end{aligned}$$

З якою ж метою виконуються приведені вище перетворення?

По-перше, з метою спрощення завдання вихідних даних, по-друге, для прискорення процесу розрахунку системи диференціальних рівнянь, яка описує

процеси, що виникають в найбільш складному елементі мережі, й яка буде наведена нижче у даній роботі.

Рівняння (2.7) спростяться через можливість використання осей симетрії ротора й приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 \psi_a &= \psi_{as} + \psi_{af} = L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + M_{af} \cdot i_f \\
 \psi_{as} &= L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c = \\
 &= (l_d \cdot \cos^2 \gamma + l_q \cdot \sin^2 \gamma) \cdot (i_0 + i_d \cdot \cos \gamma + i_q \cdot \sin \gamma) - \\
 &- 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot \\
 &\cdot \left[i_0 + i_d \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] - \\
 &- 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot \\
 &\cdot \left[i_0 + i_d \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Далі групуються попередній вираз за величинами складових струму:

$$\begin{aligned}
\psi_{as} = & i_0 \cdot \left[(l_d + 2 \cdot m_d) \cdot \cos^2 \gamma + (l_q + 2 \cdot m_q) \cdot \sin^2 \gamma \right] + \\
& + i_d \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d \cdot \cos^2 \gamma - 2 \cdot m_d \cdot \left(\cos^2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos^2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_d \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma - 2 \cdot m_q \cdot \left(\sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma - 2 \cdot m_d \cdot \left(\sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q \cdot \sin^2 \gamma - 2 \cdot m_q \cdot \left(\sin^2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin^2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right]
\end{aligned}$$

Виконуються математичні спрощення:

$$\begin{aligned}
\psi_{as} = & i_0 \cdot \left[(l_d + 2 \cdot m_d) \cdot \cos^2 \gamma + (l_q + 2 \cdot m_q) \cdot \sin^2 \gamma \right] + \\
& + i_d \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d - m_d - \sin^2 \gamma \cdot \left((l_d + 2 \cdot m_d) - (l_q + 2 \cdot m_q) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q - m_q + \cos^2 \gamma \cdot \left((l_d + 2 \cdot m_d) - (l_q + 2 \cdot m_q) \right) \right]
\end{aligned}$$

Враховуючи приведені раніше співвідношення для індуктивності:

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= l_d + 2 \cdot m_d = l_q + 2 \cdot m_q \\ L_d &= l_d - m_d \\ L_q &= l_q - m_q \end{aligned} \right\}$$

потокосцеплення будуть складати

$$\left. \begin{aligned} \psi_{as} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \gamma + L_q \cdot i_q \cdot \sin \gamma \\ \psi_{bs} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + L_q \cdot i_q \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_{cs} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + L_q \cdot i_q \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\}$$

Для режиму ХХ, коли $i_a = i_b = i_c = 0$ і $i_f = \text{const}$, потокозчеплення будуть складати:

$$\begin{aligned} \psi_a &= M_{af} \cdot i_f \cdot \cos(\gamma) \\ \psi_b &= M_{bf} \cdot i_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_c &= M_{cf} \cdot i_f \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_f &= L_f \cdot i_f \end{aligned}$$

Напруга, яка наводиться, буде складати:

$$\begin{aligned} u_a &= -\frac{d\psi_a}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) \\ u_b &= -\frac{d\psi_b}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_c &= -\frac{d\psi_c}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_f &= \omega \cdot L_f \cdot i_f \end{aligned}$$

Так як $\lambda = -\frac{\pi}{2}$, то ЕРС ХХ буде співпадати з позитивним напрямком поперечної осі машини.

Основна задача – це розгляд перехідних процесів в реальних, неідеальних, несиметричних машинах. Теорія несиметричних режимів базується на трьох складових, які роздивимося окремо.

Спочатку фазні струми прямої послідовності (ПП):

$$\begin{aligned} i_{a1} &= i \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ i_{b1} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c1} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Вектор i обертається в позитивному напрямку з кутовою швидкістю ω :

$$\lambda = \omega t + \varphi - \gamma$$

Якщо відлік часу буде реалізовуватися від моменту співпадіння осей $0d$ і $0a$, то $\gamma = \omega t$.

Узагальнений вектор струму буде утворювати з осями симетрії ротора відповідні кути φ і $\varphi + \frac{\pi}{2}$. Тому його проекції будуть визначатися:

$$\begin{aligned} i_d &= i \cdot \cos(\varphi) \\ i_q &= -i \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Можуть бути й окремі випадки:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 0 \\ i_d &= i, \quad i_q = 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= -\frac{\pi}{2} \\ i_d &= 0, \quad i_q = i \end{aligned} \right\}$$

Для струмів ГП фазні напруги визначаються наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -\frac{d\Psi_a}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin(\gamma) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos(\gamma) \\ u_b &= -\frac{d\Psi_b}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= -\frac{d\Psi_c}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Якщо ввести позначення:

$$\begin{aligned} u_d &= \omega \cdot L_d \cdot i_d \\ u_q &= \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ u_f &= \omega \cdot L_f \cdot i_f \end{aligned}$$

то отримуємо наступні рівняння

$$\left. \begin{aligned} u_a &= (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) - u_q \cdot \cos(\gamma) \\ u_b &= (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) - u_q \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) - u_q \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

У випадку фазних струмів зворотної послідовності:

$$\begin{aligned}
 i_{a2} &= i \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\
 i_{b2} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_{c2} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Вихідні рівняння для осей симетрії ротора приймуть наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 i_0 &= 0 \\
 i_d &= i \cdot \cos(2\gamma + \varphi) = i \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \\
 i_q &= i \cdot \sin(2\gamma + \varphi) = i \cdot \sin(2\omega t + \varphi)
 \end{aligned} \right\}$$

Згідно рис. 2.12 - 2.13 можна визначити кут між узагальненим вектором струму й осями d і a .

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg}(\lambda) &= -\frac{i_q}{i_d} = -\operatorname{tg}(2\gamma + \varphi) \\
 \lambda &= -(2\gamma + \varphi)
 \end{aligned}$$

Враховуючи взаємне розташування осей (рис. 2.13):

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\lambda + \gamma}_{\alpha} &= -\gamma - \varphi \\
 \alpha &= -(\gamma + \varphi) = -(\omega t + \varphi)
 \end{aligned}$$

Отже узагальнений вектор струму ЗП обертається:

- по відношенню до нерухомих осей фазних обмоток статора в протилежну сторону з кутовою швидкістю ω ;
- по відношенню до рухомих осей ротора в протилежну сторону з кутовою швидкістю 2ω .

Далі використавши отриманні співвідношення рівняння (2.17) приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= 0 \\ i_d &= i \cdot \cos(2\gamma + \varphi) \\ i_q &= i \cdot \sin(2\gamma + \varphi) \end{aligned} \right\}$$

Далі

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -2 \cdot \omega \cdot i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= 2 \cdot \omega \cdot i_d \end{aligned} \right\}$$

Якщо використати отримані попередні залежності, то можна визначити

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos(\gamma) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos(\gamma) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos(\gamma) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin(\gamma) \\ u_b &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

В останньому рівнянні для складових, які відповідають контуру обмотки ротора:

$$\begin{aligned} i_f &= -\frac{3}{2} \cdot \frac{M_d}{L_f} \cdot i_d \\ \frac{di_f}{dt} &= 3 \cdot \omega \cdot \frac{M_d}{L_f} \cdot i_q \end{aligned}$$

і воно приймає вигляд

$$\left. \begin{aligned}
u_a &= -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(2\gamma + \varphi) + \\
&+ \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(2\gamma + \varphi) \\
u_b &= -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) + \\
&+ \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \\
u_c &= -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) + \\
&+ \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right)
\end{aligned} \right\}$$

Наступні перетворення

$$\begin{aligned}
u_a &= -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - \underbrace{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)}_{\frac{L_d'}{L_d}} \right) \cdot \underbrace{\cos(\gamma) \cdot \sin(2\gamma + \varphi)}_{0,5[\sin(2\gamma + \varphi - \gamma) + \sin(2\gamma + \varphi + \gamma)]} + \\
&+ \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\underbrace{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)}_{\frac{L_d'}{L_d}} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \underbrace{\sin(\gamma) \cdot \cos(2\gamma + \varphi)}_{0,5[\sin(\gamma - 2\gamma - \varphi) + \sin(\gamma + 2\gamma + \varphi)]} =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\omega \cdot i \cdot \left(\frac{1}{2} L_q - L'_d \right) \cdot [\sin(\gamma + \varphi) + \sin(3\gamma + \varphi)] + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \cdot [\sin(-\gamma - \varphi) + \sin(3\gamma + \varphi)] = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d - \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \right] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d + \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \right] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d - \frac{L'_d}{2} + L_q \right] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \left[\frac{3}{2} L'_d - \frac{3}{2} L_q \right] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \omega \cdot i \cdot \frac{3}{2} [L'_d - L_q] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

Для інших фаз

$$\begin{aligned}
u_b &= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{2}\right) \right] \\
u_c &= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

Отже отримані вирази дають можливість зробити важливі висновки:

перша складова струму ЗП має величину

$$\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \omega \cdot i$$

і обертається з кутовою швидкістю ω в протилежний бік;

друга складова струму ЗП має величину

$$\frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \omega \cdot i$$

і обертається з кутовою швидкістю 3ω в прямому напрямку.

Якщо знехтувати другою складовою, то індуктивний опір ЗП електричної машини:

$$x_2 = \frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \omega = \frac{1}{2} [x'_d + x_q]$$

В свою чергу перша складова – це поздовжній перехідний опір:

$$x'_d = \omega \cdot L_d \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)$$

Знайдені вирази при наявності більшої кількості контурів значно ускладнюються.

2.3 Математичний аналіз процесів в синхронній машині

Спочатку приведемо основні вирази для напруги:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u \cdot \cos(\omega t) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2}\right) = u \cdot \sin(\gamma - \theta) \\ u_b &= u \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \sin\left(\gamma - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= u \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \sin\left(\gamma - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Якщо на момент початку КЗ

$$t = 0$$

$$\angle d, \alpha = \gamma_0$$

$$\angle q, \alpha = \gamma_0 - \frac{\pi}{2} = \theta$$

то за умови $t \neq 0$

$$\gamma = \gamma_0 + \omega t = \omega t + \theta + \frac{\pi}{2}$$

Класичні рівняння рівноваги напруги у контурі

$$\begin{aligned} u_k + \frac{d\Psi_k}{dt} + r i_k &= 0 \\ k &= a, b, c \end{aligned} \quad (2.19)$$

В результаті рішення отримуємо систему:

$$\left. \begin{aligned} A \cdot \sin(\gamma) - B \cdot \cos(\gamma) &= 0 \\ A \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - B \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) &= 0 \\ A \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - B \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Для наведеної вищі системи рівнянь рішення знаходиться із системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A = \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot L_f \cdot i_f - r \cdot i_q - u \cdot \cos(\theta) &= 0 \\ B = \omega \cdot L_q \cdot i_q + r \cdot i_d - u \cdot \sin(\theta) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

а далі маємо

$$\left. \begin{aligned} x_d \cdot i_d - r \cdot i_q &= u \cdot \cos(\theta) - u_f \\ x_q \cdot i_q + r \cdot i_d &= u \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \right\}$$

Спільне рішення системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} i_q &= \frac{(u - u \cdot \sin \theta) \cdot r + x_d \cdot u \cdot \sin \theta}{x_d \cdot x_q + r^2} \\ i_d &= -\frac{(u - u \cdot \cos \theta) \cdot x_q - r \cdot u \cdot \sin \theta}{x_d \cdot x_q + r^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\underline{i} = i_q \cdot \underline{q} + i_d \cdot \underline{d}$$

Рівняння (2.19) після заміни змінних буде мати наступний вид:

$$\begin{aligned} & (u_d \cdot \cos(\gamma) + u_q \cdot \sin(\gamma) + u_0) + \\ & + \frac{d(\Psi_d \cdot \cos(\gamma) + \Psi_q \cdot \sin(\gamma) + \Psi_0)}{dt} + \\ & + r \cdot (i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma) + i_0) = 0 \end{aligned}$$

Далі виконується групування змінних

$$\begin{aligned} & \left[u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_d \right] \cdot \cos(\gamma) + \\ & + \left[u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_q \right] \cdot \sin(\gamma) + \\ & + \left[u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + r \cdot i_0 \right] = 0 \end{aligned}$$

Наведене вище рівняння виконується за умови, що

$$\left. \begin{aligned} u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_d &= 0 \\ u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_q &= 0 \\ u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + r \cdot i_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Для обмотки збудження рівняння (2.19) приймає вид:

$$u_f - \frac{d\Psi_f}{dt} - r \cdot i_f = 0 \quad (2.21)$$

а для обмоток демпферної системи

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{D_i}}{dt} + r \cdot i_{D_i} &= 0 \\ i &= 1, 2 \dots n \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{Q_j}}{dt} + r \cdot i_{Q_j} &= 0 \\ j &= 1, 2 \dots m \end{aligned} \quad (2.23)$$

Система рівнянь (2.20) – (2.23) – це система рівнянь Парка – Горева, яка описує перехідні процеси в електричних машинах:

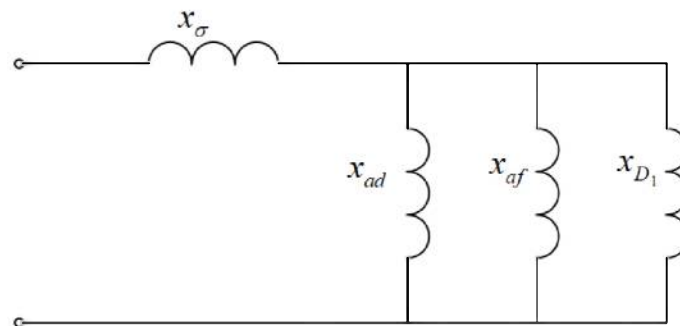
$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} - r \cdot i_d \\ u_q &= -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} - r \cdot i_q \\ u_0 &= -\frac{d\Psi_0}{dt} - r \cdot i_0 \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r \cdot i_f \\ 0 &= \frac{d\Psi_{D_i}}{dt} + r \cdot i_{D_i} \\ i &= 1, 2 \dots n \\ 0 &= \frac{d\Psi_{Q_j}}{dt} + r \cdot i_{Q_j} \\ j &= 1, 2 \dots m \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Система рівнянь (2.24) доповнюється системою рівнянь потокозчеплень, які визначаються прийнятою схемою для досліджень.

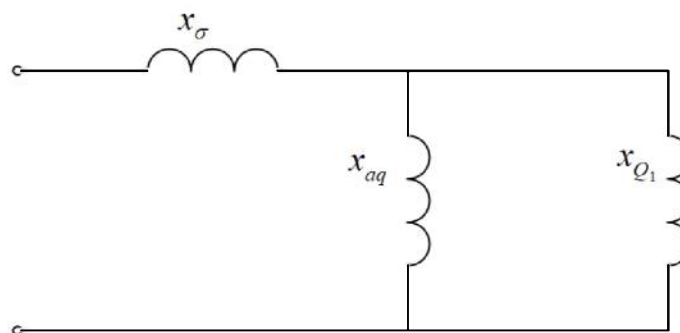
Ця система рівнянь, за умови однаковості потокорозподілу за осями симетрії ротора, прийме наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \Psi_d &= x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 \Psi_q &= x_q \cdot i_q + \sum_{j=1}^m x_{aq} \cdot i_{Q_j} \\
 \Psi_f &= x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Psi_{D_i} &= x_{ad} \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + x_{D_i} \cdot i_{D_i} + \sum_{i=1}^{n-1} x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Psi_{Q_j} &= x_{aq} \cdot i_q + x_{Q_i} \cdot i_{Q_i} + \sum_{i=1}^{m-1} x_{aq} \cdot i_{Q_i} \\
 \Psi_0 &= x_0 \cdot i_0
 \end{aligned} \right\}$$

Якщо прийняти по одному контуру за кожною віссю симетрії ротора, як вказувалося на початку розділу 2.2, то схеми заміщення електричних машин (ЕМ) приймуть вид показаний на рис. 2.14.



a



б

Рисунок 2.14 – Схеми для дослідження процесів в ЕМ

$$u_d = - \underbrace{\frac{d\Psi_d}{dt}}_{\text{ЕРС трансформації}} - \underbrace{\Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt}}_{\text{ЕРС обертання}} - r \cdot i_d \qquad u_q = - \underbrace{\frac{d\Psi_q}{dt}}_{\text{ЕРС трансформації}} + \underbrace{\Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt}}_{\text{ЕРС обертання}} - r \cdot i_q$$

В сталому режимі відсутня.

В перехідному режимі виникає при зміні струму і відповідно при зміні потокозчеплення.

Виникають при переміщенні магнітного потоку, викликаного обертанням ротора:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_c$$

При синхронній швидкості обертання ротора у в.о.: $\frac{d\gamma}{dt} = 1$

На рис. 2.15 приведена фізична інтерпретація рівнянь Парка-Горєва.

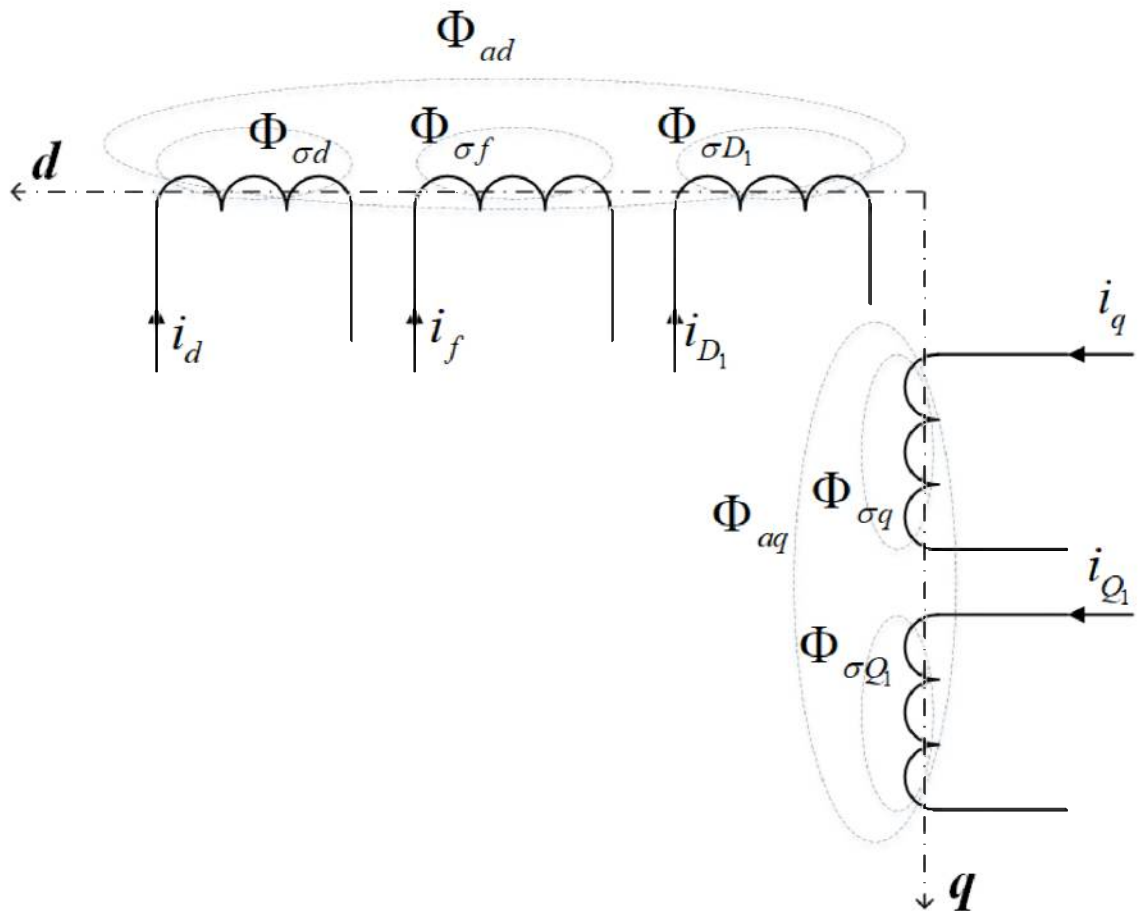


Рисунок 2.15 – Фізична інтерпретація

Основні висновки, які можна зробити:

По-перше: магнітні зв'язки між контурами по осям симетрії ротора відсутні, так як осі ортогональні.

По-друге: струм в кожному окремому контурі створює магнітний потік розсіювання Φ_{σ} , який пов'язаний тільки з відповідним контуром.

Наступне: потік взаємоіндукції є спільним для контурів, які розташовані на одній осі симетрії: Φ_{ad} є спільним для еквівалентної статорної обмотки по осі d , обмотки збудження f і поздовжньої демпферної обмотки D_1 , а Φ_{aq} є спільним для еквівалентної статорної обмотки по осі q і поперечної демпферної обмотки Q_1 .

При нормальному режимі, наприклад, при ХХ (рис. 2.16) в ЕМ будуть

- Φ_f - потік обмотки збудження (ОЗ);
- Φ_{fad} - корисний потік ОЗ;
- $\Phi_{\sigma f}$ - потік розсіювання ОЗ;
- Φ_{ad} - потік реакції обмотки статора;
- $\Phi_{\delta d}$ - поздовжній потік у повітряному зазорі;
- $\Phi_{f\Sigma}$ - результуючий потік ОЗ.



Рисунок 2.16 – Діаграма для нормального режиму

Ці потоки зв'язані співвідношеннями, які враховують не лише модуль, а й геометрію векторів:

$$\underline{\Phi}_f = \underline{\Phi}_{fad} + \underline{\Phi}_{\sigma f}$$

$$\underline{\Phi}_{fad} = \underline{\Phi}_{\delta d} - \underline{\Phi}_{ad}$$

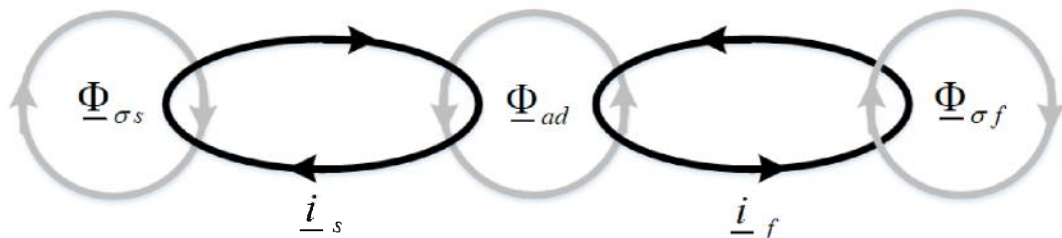
Отже результуючий потік ОЗ:

$$\underline{\Phi}_{f\Sigma} = \underline{\Phi}_{\sigma f} + \underline{\Phi}_{\delta d}$$

$$\underline{i} \Rightarrow \underline{\Phi} = f(\underline{i}) \Rightarrow \underline{e} = f(\underline{\Phi})$$

$$\underline{e} = -\Delta U(\underline{i})$$

магнітний зв'язок між обмотками статора і ротора



раптова зміна струму в одній з обмоток – в іншій наводиться струм, який прагне підтримати потокозчеплення даної обмотки незмінним

Рисунок 2.17 – До питання порушення нормального режиму

У випадку виникнення КЗ (рис. 2.18) через збільшення струму статора спочатку збільшиться магнітний потік реакції статора на величину $\Delta \underline{\Phi}_{ad}$ (червона пунктирна лінія). Нове значення буде складати (червона суцільна лінія):

$$\underline{\Phi}'_{ad} = \underline{\Phi}_{ad} + \Delta \underline{\Phi}_{ad}$$

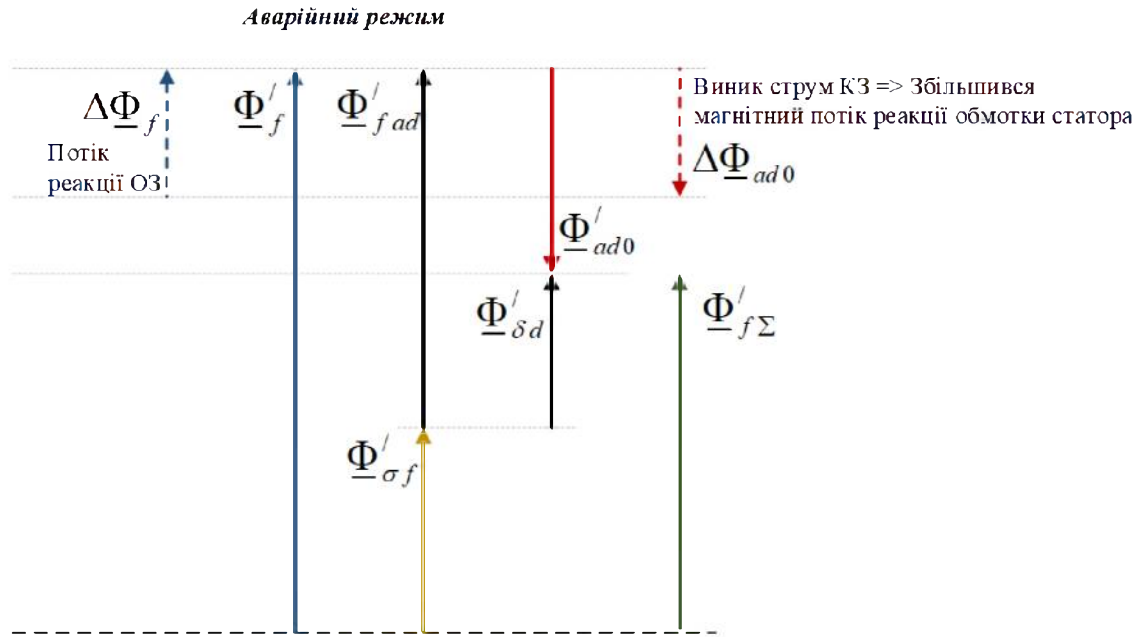


Рисунок 2.18 – Діаграма для аварійного режиму

Зміні $\Delta\Phi_{ad}$ відповідає реакція обмотки збудження $\Delta\Phi_f$. Так як

$$\Delta\Phi_f + \Delta\Phi_{ad} = 0$$

то

$$\Delta I_d \cdot x_{ad} + \Delta I_f \cdot (x_{\sigma f} + x_{ad}) = 0$$

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{\sigma f}}{\Phi_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \text{const}$$

Збільшення величини магнітного потоку ОЗ з Φ_f до Φ'_f має наслідком збільшення потоку розсіювання ОЗ з $\Phi_{\sigma f}$ до $\Phi'_{\sigma f}$ і зменшення поздовжнього потоку в повітряному зазорі з величини з $\Phi_{\delta d}$ до $\Phi'_{\delta d}$.

Незмінним залишиться результуючий потік зчеплений з ОЗ:

$$\Phi_{f\Sigma} = \Phi'_{f\Sigma}$$

Графічне пояснення показано на рис. 2.19.

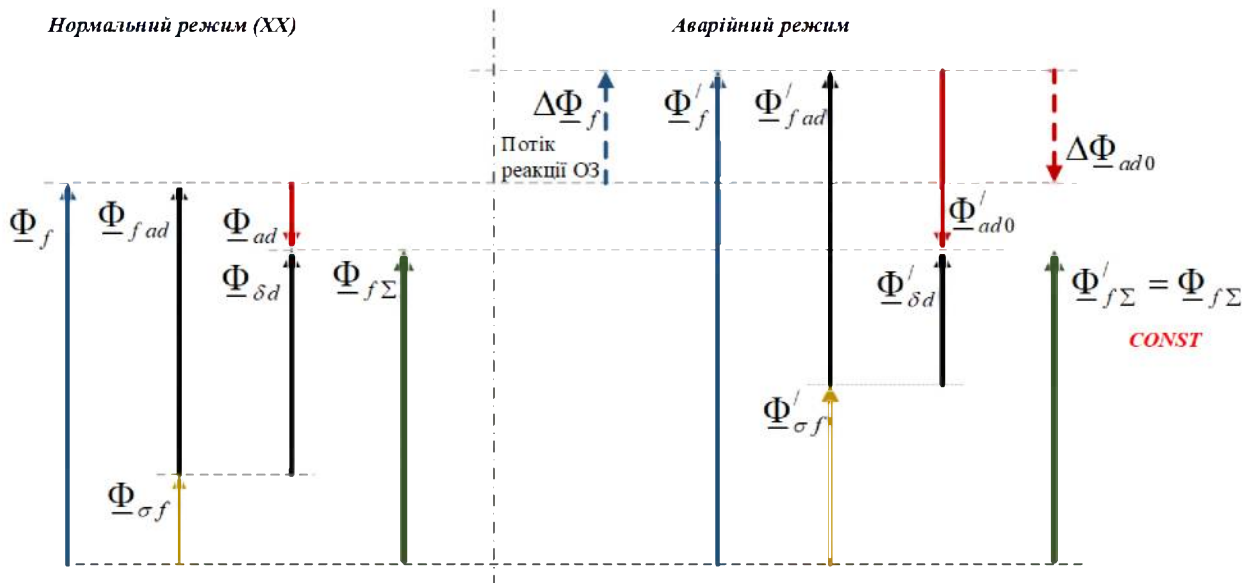


Рисунок 2.19 – Порівняння потоків

На рисунку порівнюються магнітні потоки до і після виникнення КЗ.

Потокозчеплення Ψ_d' – це частина $\Psi_{f\Sigma}'$, яка пов'язана зі статором:

$$\Psi_d' = (1 - \sigma_f) \cdot \Psi_{f\Sigma}'$$

$$\begin{aligned} \Psi_d' &= (1 - \sigma_f) \cdot (x_f + x_{ad}) = \\ &= \underline{I}_f \cdot x_{ad} + \underline{I}_d' \cdot x_{ad} + \underline{I}_d' \cdot \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \end{aligned}$$

Потокозчеплення Ψ_d' відповідає E_q' , яка в свою чергу визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}
 E_q' &= E_q - j I_d \cdot \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \\
 &= U_q + j I_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) = U_q + j I_d \cdot x_d'
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

Остання формула визначає поперечну перехідну ЕРС E_q' і поздовжній перехідний опір:

$$x_d' = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}$$

Таким чином є можливість визначити ЕРС за поперечною віссю симетрії:

$$E_q = E_q' + j I_d \cdot (x_d - x_d') \tag{2.26}$$

Поздовжній перехідний опір можна визначити і за схемою заміщення – рис.2.20.

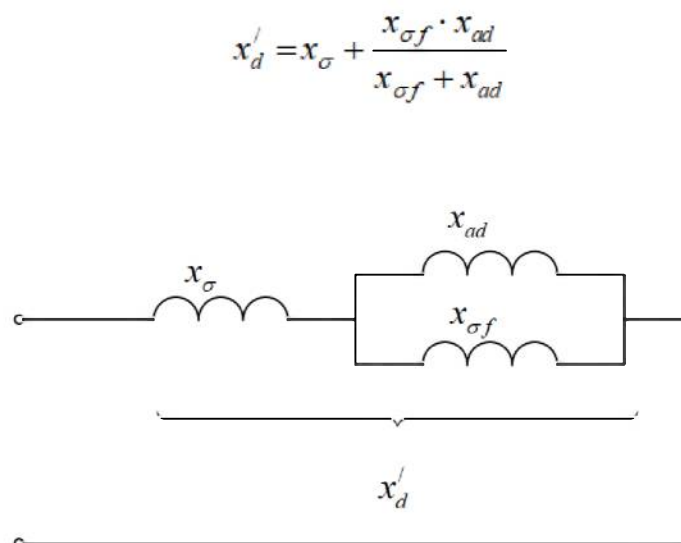


Рисунок 2.20 - Для СМ без ДО

Рівнянням (2.25)-(2.26) відповідає векторна діаграма – рис. 2.21.

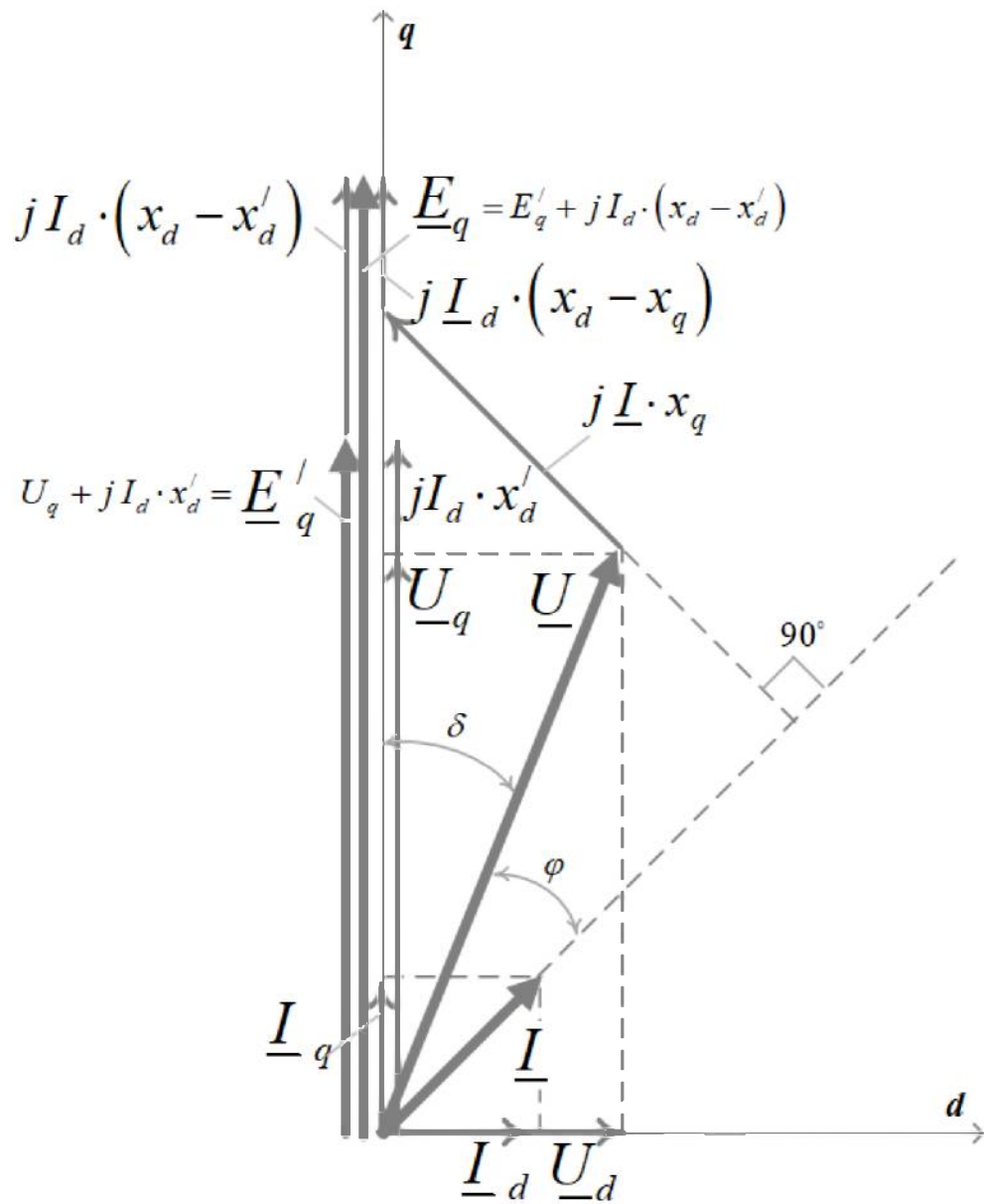


Рисунок 2.21 – Векторна діаграма СМ без ДО

Для заданої конструкції СМ визначимо струм:

$$E_d' = 0, \quad x_q' = x_q$$

$$I_d' = \frac{E_q'}{x_d + x_{\text{зобН}}}$$

Якщо за конструкцією передбачена демпферна система, то у випадку виникнення КЗ збільшенню магнітного потоку реакції статора $\Delta\Phi_{ad}$ буде відповідати приріст не лише потоку обмотки збудження $\Delta\Phi_f$, але й приріст потоку демпферної обмотки $\Delta\Phi_{D1}$. Для умови збереження балансу

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_f \cdot (x_{\sigma f} + x_{ad}) + \Delta I_{D1} \cdot x_{ad} + \Delta I_d \cdot x_{ad} &= 0 \\ \Delta I_f \cdot x_{ad} + \Delta I_{D1} \cdot (x_{\sigma D1} + x_{ad}) + \Delta I_d \cdot x_{ad} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Рішення системи рівнянь:

$$\Delta I_f \cdot x_{\sigma f} = \Delta I_{D1} \cdot x_{\sigma D1}$$

Отже струм, який наводиться в обмотці, визначається оберненою залежністю від опору розсіювання цієї обмотки:

$$\begin{aligned} \Delta I_f &= \frac{\Delta I_{D1} \cdot x_{\sigma D1}}{x_{\sigma f}} \\ \Delta I_{D1} &= \frac{\Delta I_f \cdot x_{\sigma f}}{x_{\sigma D1}} \end{aligned}$$

Для еквівалентної обмотки ΔI_{fD1} з еквівалентним опором розсіювання $x_{\sigma fD1}$

$$\begin{aligned} \Delta I_{fD1} \cdot (x_{\sigma fD1} + x_{ad}) &= (\Delta I_f + \Delta I_{D1}) \cdot (x_{\sigma fD1} + x_{ad}) = -\Delta I_d \cdot x_{ad} \\ x_{\sigma fD1} &= \frac{x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma D1}}{x_{\sigma f} + x_{\sigma D1}} \end{aligned}$$

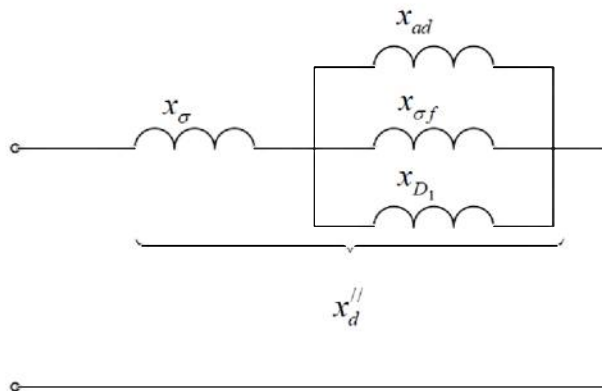
Аналогічно визначаються надперехідні реактивні опори (рис. 2.22):

$$x_d^{//} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f D1} + x_{ad}} = x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma f D1} \cdot x_{ad}}{x_{\sigma f D1} + x_{ad}} = x_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma D1}}}$$

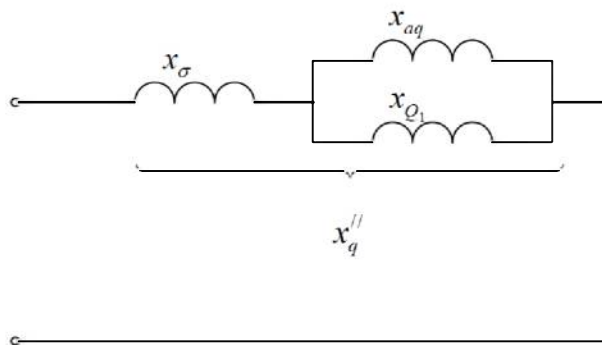
$$x_q^{//} = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{\sigma Q1}} = x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma Q1}}{x_{\sigma Q1} + x_{aq}}$$

За кожним з цих опорів прикладена відповідна ЕРС:

$$\begin{aligned} \underline{E}_d^{//} &= \underline{U}_d + j \underline{I}_q x_q^{//} \\ \underline{E}_q^{//} &= \underline{U}_q + j \underline{I}_d x_d^{//} \end{aligned} \quad (2.27)$$



a



б

Рисунок 2.22 - Для СМ з ДО

Рівнянням (2.27) відповідає векторна діаграма – рис. 2.23.

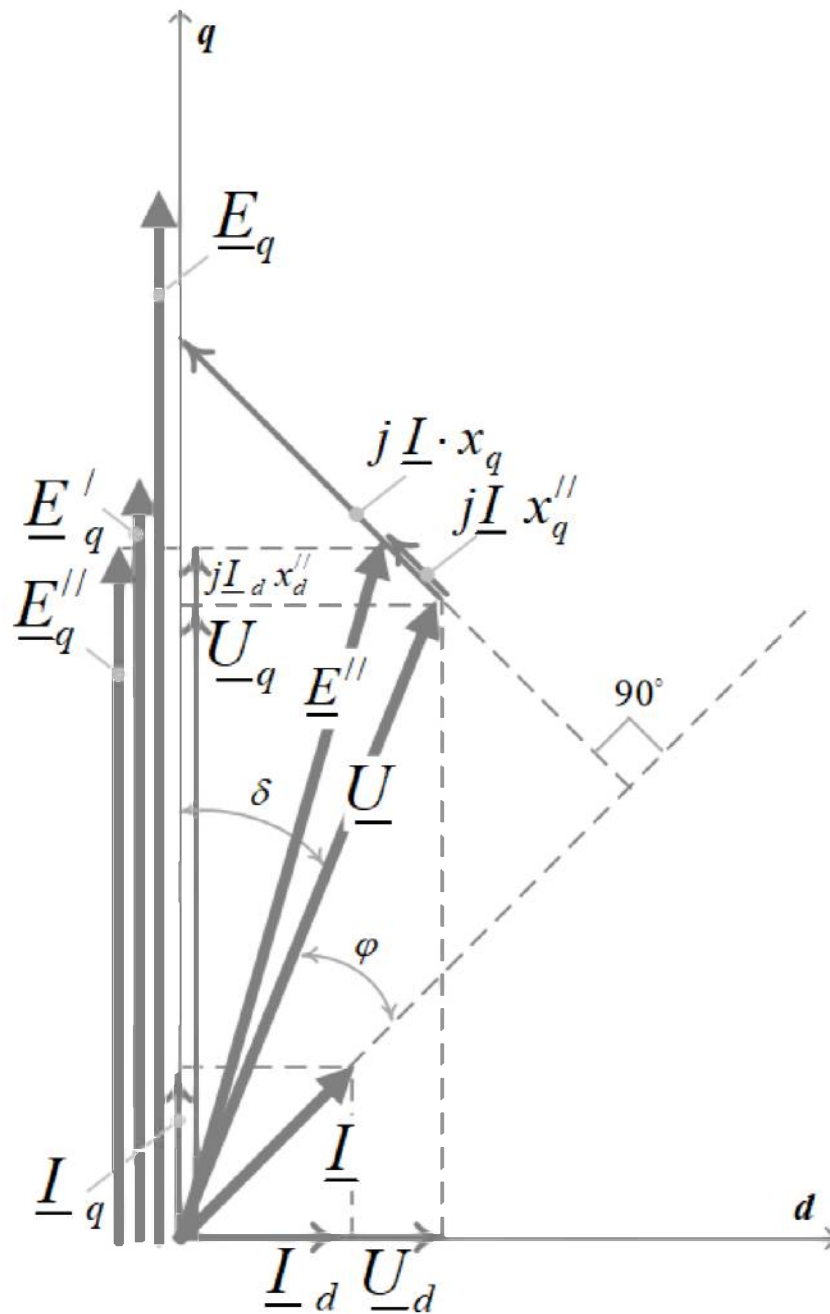


Рисунок 2.23 – Векторна діаграма СМ з ДО

2.4 Практичні методи розрахунку

Для практичних розрахунків струмів КЗ використовуються наступні вирази:

$$x_d'' < x_d' < x_d$$

$$x_d^{//} < x_q^{//}$$

Для СМ без ДО:

$$I_{d(0)}' = \frac{E_{q(0)}'}{x_d' + x_{зобн}} \quad I_{q(0)}' = 0$$

Для СМ з ДО:

$$I_{d(0)}^{//} = \frac{E_{q(0)}^{//}}{x_d^{//} + x_{зобн}}$$

$$I_{q(0)}^{//} = \frac{E_{d(0)}^{//}}{x_q^{//} + x_{зобн}}$$

$$I_{(0)}^{//} = \sqrt{\left(I_{d(0)}^{//}\right)^2 + \left(I_{q(0)}^{//}\right)^2}$$

$$E^{//} = \sqrt{\left(E_d^{//}\right)^2 + \left(E_q^{//}\right)^2}$$

$$E_{\approx}^{//} = \sqrt{\left(U \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(U \cdot \sin \varphi + I \cdot x_d^{//}\right)^2}$$

Таким чином

$$I_{(0)}^{//} = \frac{E_{\approx}^{//}}{x_d^{//} + x_{зобн}}$$

Окремо в розрахунках ГП розглядається вплив навантаження –
рис. 2.24.

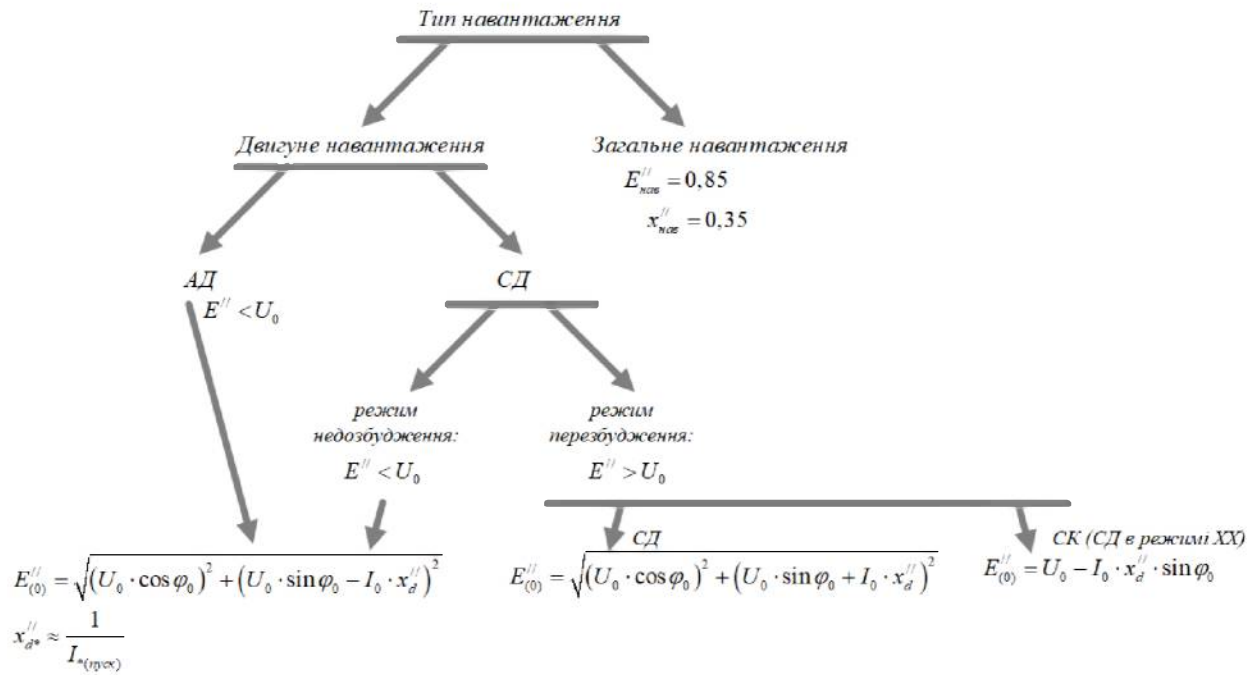


Рисунок 2.24 – До питання впливу навантаження

Допустим є не враховувати двигуне і загальне навантаження в наступних випадках: якщо вони відділенні від місця КЗ подвійною трансформацією; або якщо вони спільні опори, які пов'язують їх з місцем КЗ разом з основними, більш потужними джерелами (генераторами, системою).

Наступні етапи розрахунків:

$$I_{пер(0)}'' = \sum_{i=1}^n \frac{E_{(0)i}''}{x_i''}$$

$$i_{анер(0)i}'' = \sqrt{2} \cdot I_{пер(0)i}''$$

$$I_{пер(t)i}'' = \gamma \cdot I_{пер(t)i}''$$

$$i_{анер(t)i}'' = i_{анер(0)i}'' \cdot e^{-t/T_{анер i}} = \sqrt{2} \cdot I_{пер(0)i}'' \cdot e^{-t/T_{анер i}}$$

$$i_{зд i} = \sqrt{2} \cdot I_{пер(0)i}'' \cdot k_{зд} = \sqrt{2} \cdot I_{пер(0)i}'' \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_{анер i}}} \right)$$

2.5 Висновки за другим розділом

У другому розділі розглядаються фізичні явища, які виникають в ЕЕС системах при виникненні перехідних процесів.

Особливу увагу приділено питанням перехідних процесів синхронних машин без демпферних обмоток або з ними. Розглянуті диференційні рівняння, які у повній мірі описують перехідні процеси. Вони враховують основні складові електромагнітного перехідного процесу в електричній машині, і ці рівняння визначають струм раптового трифазного КЗ.

На векторних діаграмах проаналізовані складові струмів КЗ, їх залежність від попереднього режиму і характеру навантаження.

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

3.1 Характеристика мережі

Для розрахунків струмів КЗ роздивимося схему електричної станції. На рис. 3.2 показана схема її підключення до електричної системи. На рис. 3.3 показана електрична схема електростанції, а на рис.3.1 – аналіз цієї схеми. На рис. 3.4 показана схема власних потреб електростанції.

ВРП 330 кВ - півтора вимикача на приєднання (7 приєднань):

блочний генераторний трансформатор;

ЛЕП до Зміївської ТЕС;

ЛЕП до ПС Купянськ;

ЛЕП до ПС Майську-330;

ЛЕП до ПС Донбаська-750 (2хАСО-400);

два автотрансформатора (13 АТ А і 13 АТ Б) 250 МВА (зв'язок з ВРП 220 кВ);

два автотрансформатора (11 АТ А і 11 АТ Б) 200 МВА (зв'язок з ВРП 110 кВ).

ВРП 220 кВ - дві системи шин з обхідною системою шин (7 приєднань):

два автотрансформатора (13 АТ А і 13 АТ Б) 250 МВА;

група однофазних автотрансформаторів (12 АТ) 3х66 МВА;

ЛЕП №1 до ПС ЛИП;

ЛЕП №2 до ПС ЛИП;

трансформатор з розщепленою обмоткою ТРДН-63000/220 (204 Т);

шиноз'єднувальний вимикач 220 кВ;

обхідний вимикач 220 кВ.

ВРП 110 кВ - дві системи шин з обхідною системою шин (21 приєднання):

генераторні трансформатори (13 Т) 2х60 МВА;

автотрансформатори (11 АТ А і 11 АТ Б) 200 МВА;

група однофазних автотрансформаторів (12 АТ) 3х66 МВА;

тринадцять приєднань ЛЕП 110 кВ до споживчих підстанцій;

трансформатор з розщепленою обмоткою ТРДН-40500/220 (203 Т);

трансформатор потужністю 10 МВА (201 Т);

шиноз'єднувальний вимикач 220 кВ;

обхідний вимикач 220 кВ.

Рисунок 3.3 – Аналіз схеми

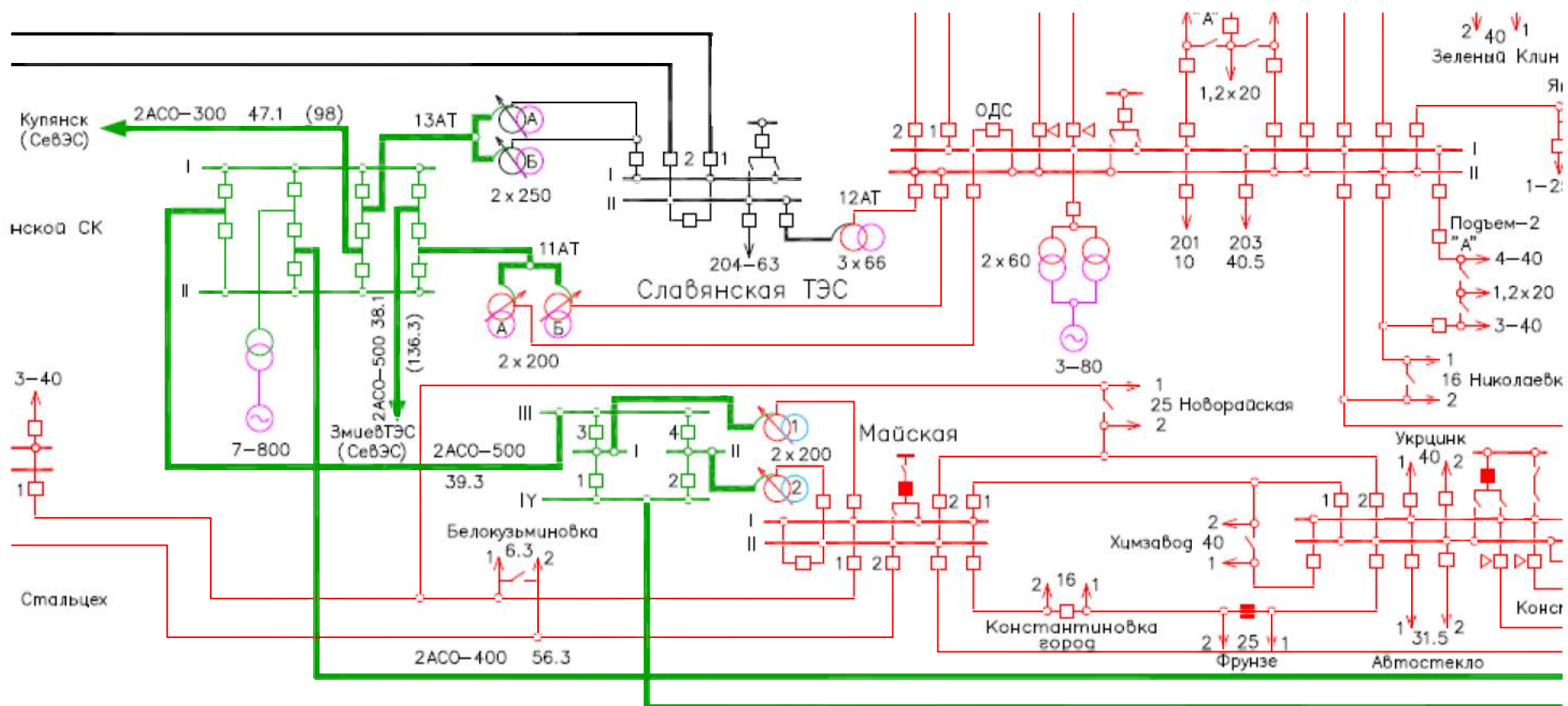
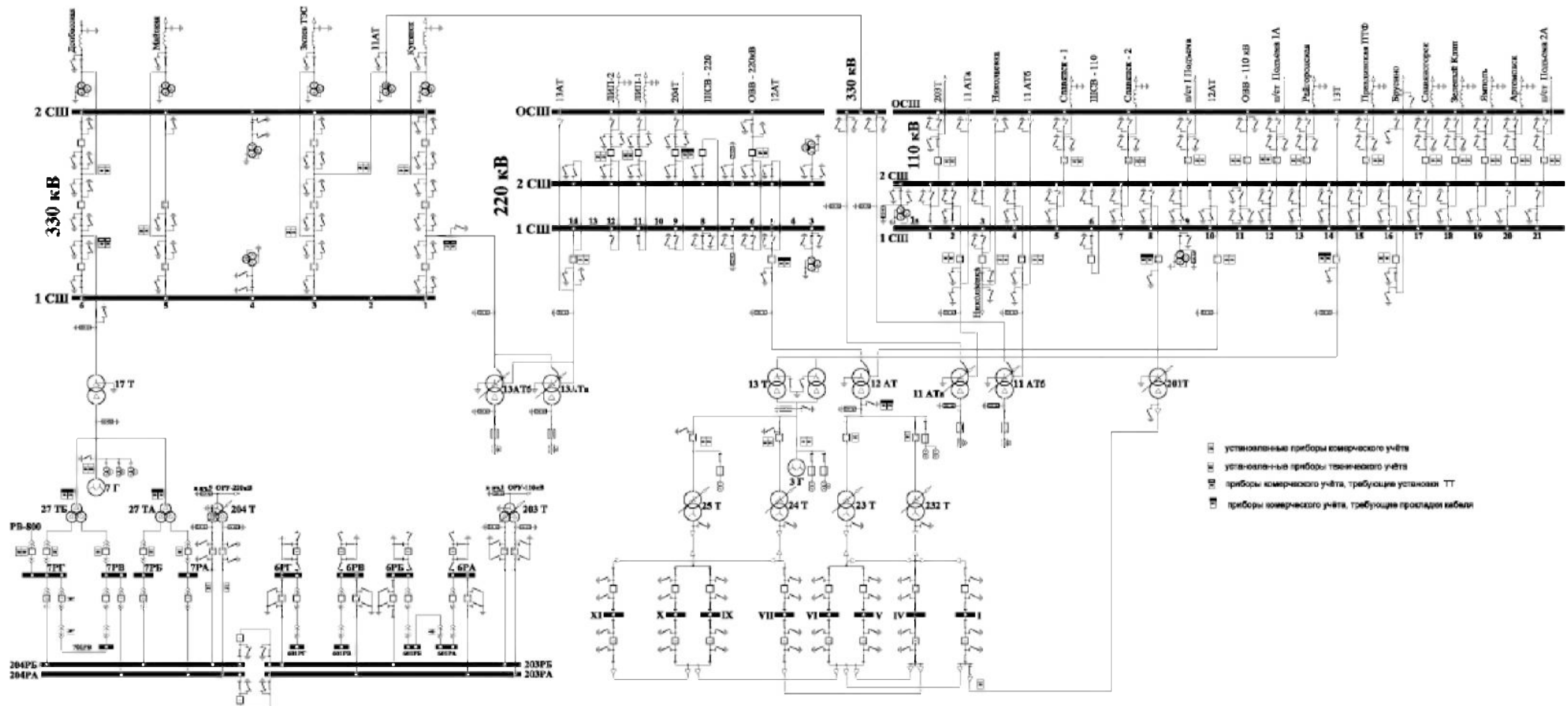


Рисунок 3.1 – Схема електричної мережі



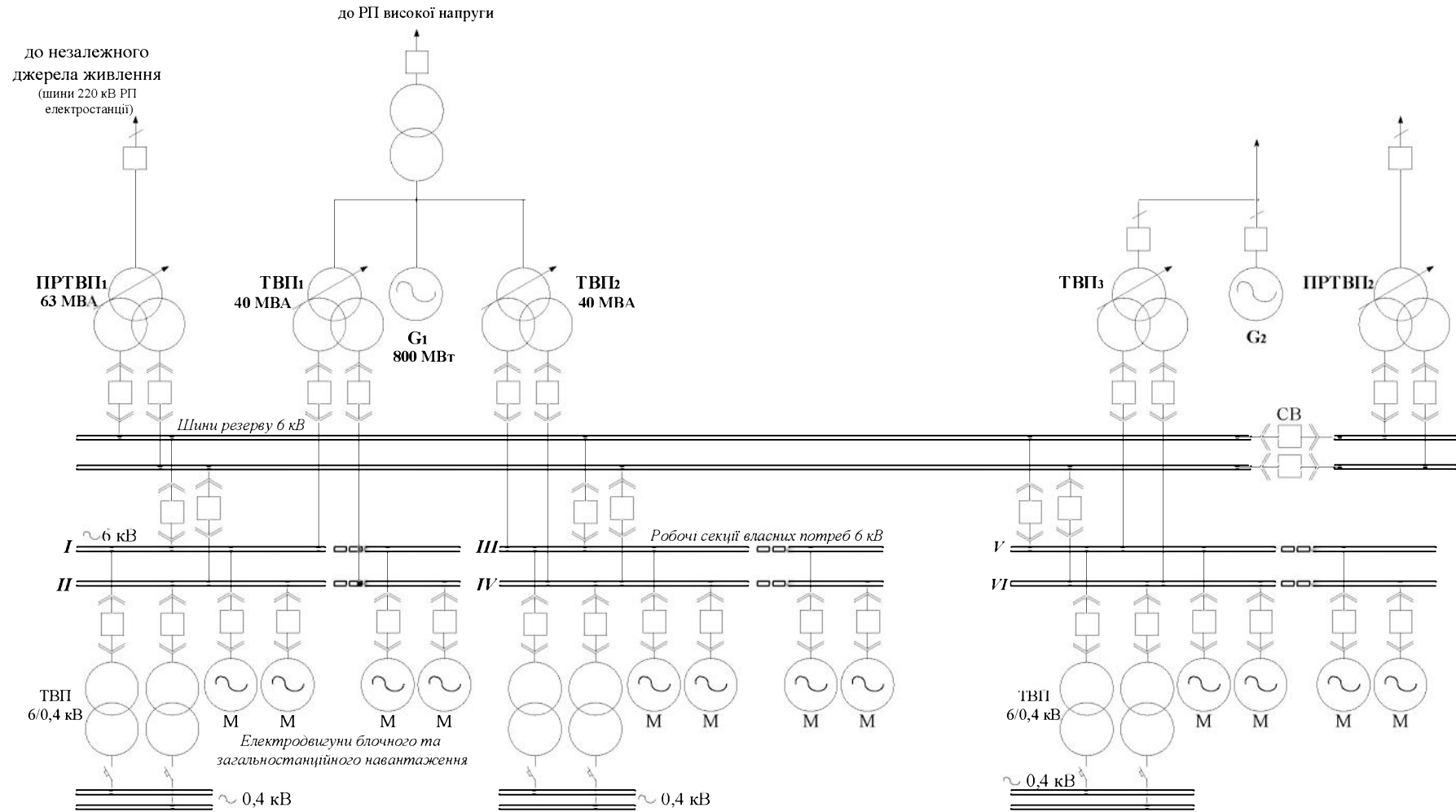


Рисунок 3.4 – Схема електропостачання власних потреб блока 800 МВт

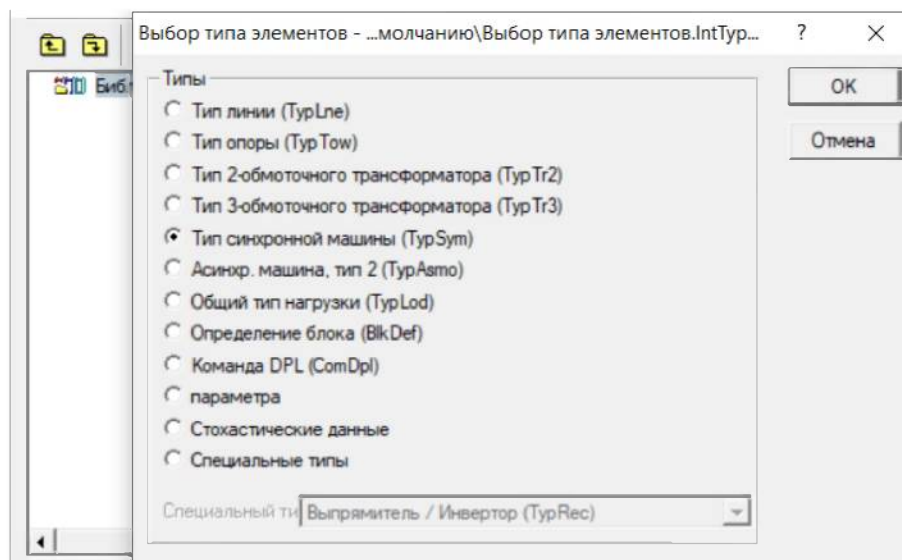
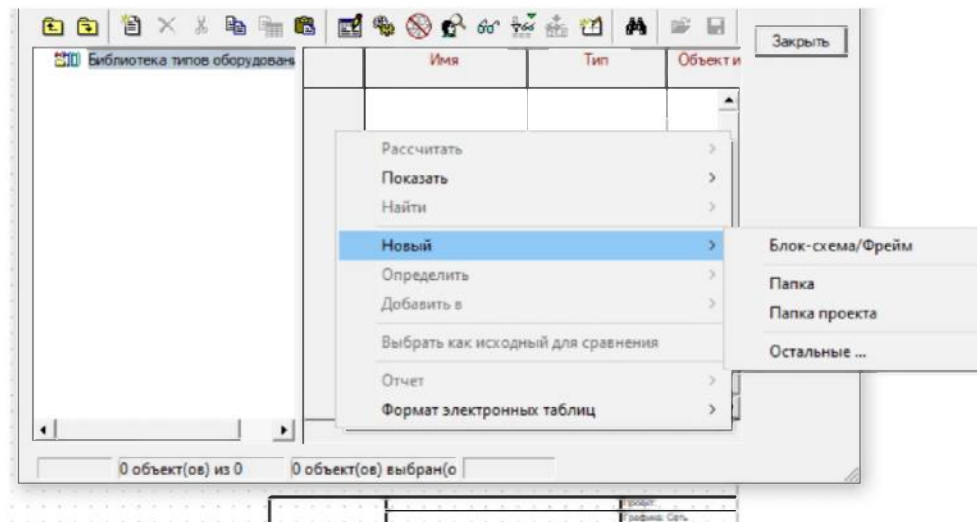
Для генератора задаются наступні параметри (рис. 3.5-3.6):

$$S_{ном} = 888,9 \text{ MVA}, P_{ном} = 800 \text{ MW}, U_{ном} = 24 \text{ kV},$$

$$U_{f.ном} = 612 \text{ kV}, I_{f.xx} = 1287 \text{ A}, I_{f.ном} = 3790 \text{ A},$$

$$x_d'' = 0,219 \text{ в.о.}, x_d' = 0,307 \text{ в.о.}, x_d = 2,33 \text{ в.о.},$$

$$x_2 = 0,327 \text{ в.о.}, x_0 = 0,13 \text{ в.о.}$$



Имя	ТВВ-800-2У3	
Ном. полная мощность	888,9	MVA
Ном. напряжение	24.	kV
Коэф. мощности	0,9	
Соединение	YN	

Рисунок 3.5 – Параметры генератора

☐ Вращающийся резерв, если КА откл.
☐ Опорная машина
 Тип СШ: PQ

Режим регулирования
☒ Коэф. мощности
☐ Напряжение

Внешн. вторичн. контроллер: ...
 Стационарный регулятор: ...

Ввод данных:
 Режим ввода: P, cos(phi)
 Акт. мощность: 800. MW
 Коэф. мощности: 0.9 инд.
 Напряжение: 1. p.u.
 Угол: 0. deg
 Крут. СЧХ пере. рег.: 0. MW/Hz

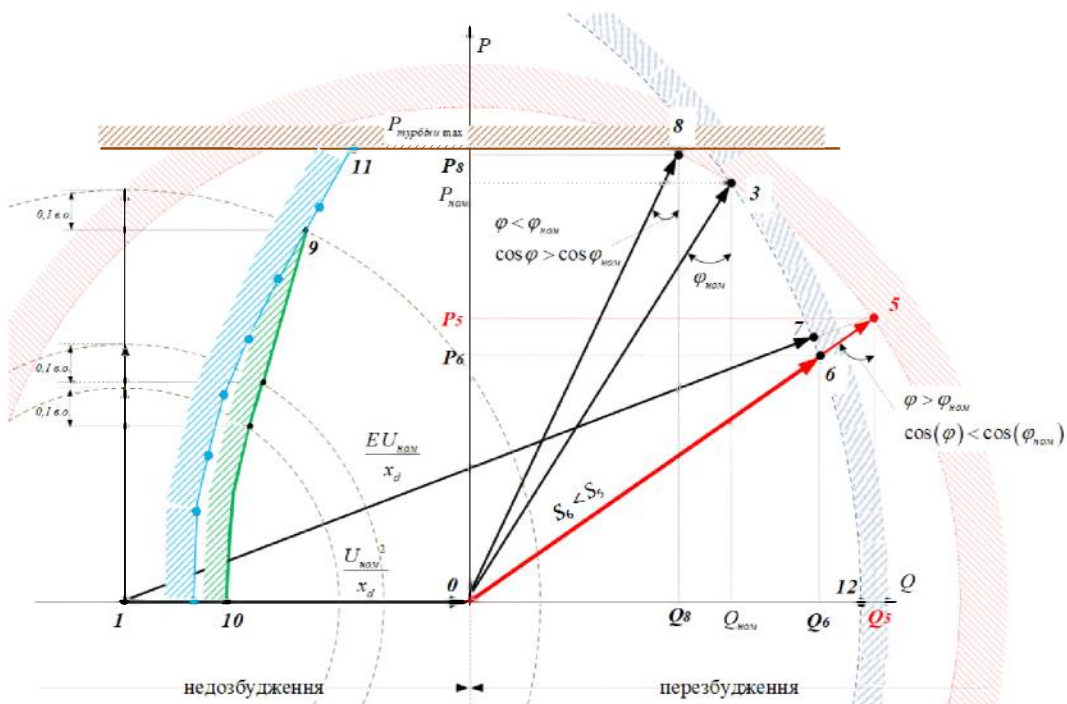
Характеристика мощности

Эксплуатационный предел по Реак. мощности
 Х-жа мощности: ...
☐ Использовать заданные в типе
 Мин. -1. p.u. -888.9 Mvar Масшт. коэф. (мин.) 100. %
 Макс. 1. p.u. 888.9 Mvar Масшт. коэф. (макс.) 100. %

Эксплуатационный предел по Акт. мощности
 Мин. 0. MW
 Макс. 9999. MW Pn 800.01 MW

Акт. мощность: Номинал
 Max. 800.01 MW Ном. коэф. 1. Pn 800.01 MW

а



б

Рисунок 3.6 – Векторна діаграма генератора

Генератор, що обертається, перед включенням на паралельну роботу з системою, обов'язково випробовується. Визначаються

- опір ізоляції;

- комплексний опір обмотки збудження;
- електричні характеристики, до яких відносяться характеристика ХХ і навантажувальна характеристика збудника, характеристика ХХ і регулювальні характеристики генератора.

Характеристика ХХ і навантажувальна характеристика збудника $U_f = f(I_f)$ визначаються за двома умовами:

$$\left. \begin{array}{l} n = n_{ном} \\ I_{нов} = 0 \end{array} \right\}$$

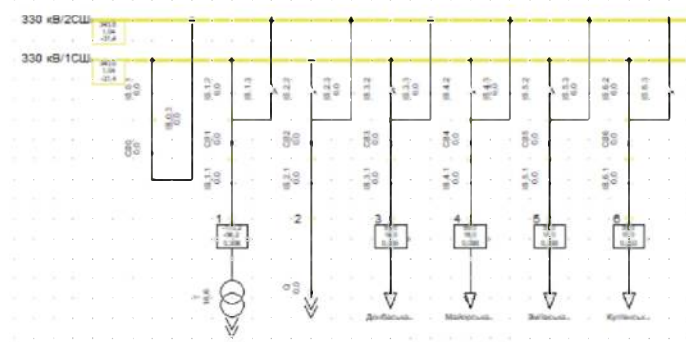
За умови $I_f = var$ визначаються вони обидві і в області малих струмів вони відрізняються незначно.

Характеристика КЗ $I_s = f(I_f)$ визначається за умови номінального струму статора.

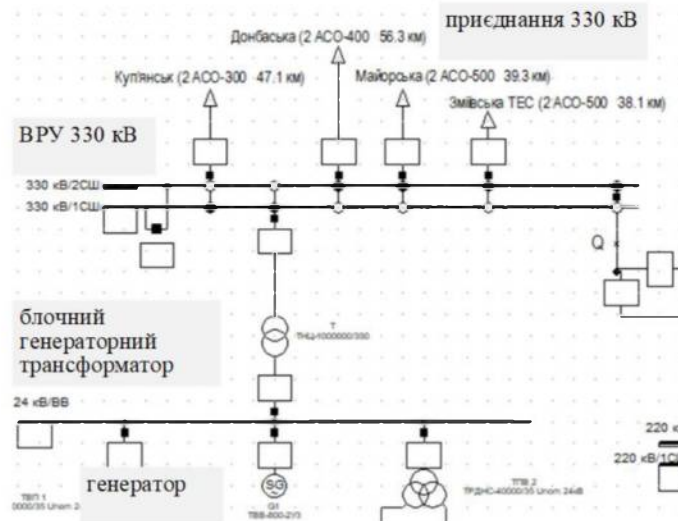
Блочний трансформатор (ТНЦ-100000/330) працює на шини 330 кВ. Його параметри приведені на рис. 3.7.

Рисунок 3.7 – Блочний генераторний трансформатор

Далі – приведена схема 330 кВ. Вона показує розподіл приєднань по шинам розподільчого устрою.



а



б

Рисунок 3.8 – ВРУ 330 кВ

Далі визначаються параметри АТ зв'язку – рис.3.9.

Прохідна потужність:

$$S_{\text{прох.АТ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{в.НОМ}} \cdot I_{\text{в.НОМ}} - \text{це } S_{T_{\text{жв}}},$$

яку не перевищує потужність послідовної обмотки

$$\begin{aligned} S_{\text{в.НОМ}} &= \sqrt{3} \cdot I_{\text{в.НОМ}} \cdot (U_{\text{в.НОМ}} - U_{\text{с.НОМ}}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot I_{\text{в.НОМ}} \cdot U_{\text{в.НОМ}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{с.НОМ}}}{U_{\text{в.НОМ}}}\right) = \\ &= \sqrt{3} \cdot I_{\text{в.НОМ}} \cdot U_{\text{в.НОМ}} \cdot \left(1 - \frac{w_c}{w_\phi}\right) = S_{\text{прох.АТ}} \cdot \left(1 - \frac{w_c}{w_\phi}\right) \end{aligned}$$

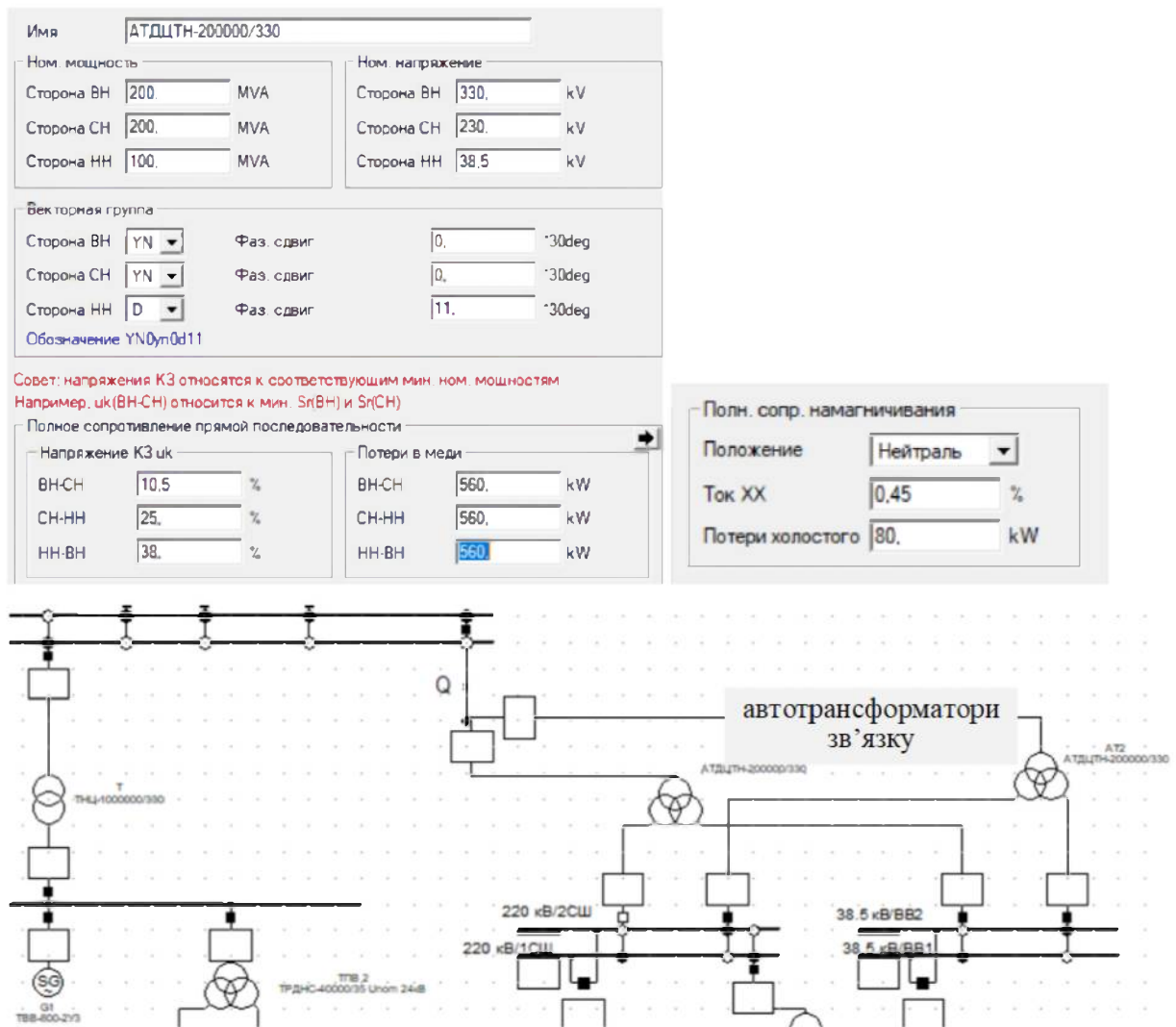


Рисунок 3.8 – АТ 330/220

Від шин генераторної напруги відходять два трансформатори типу ТРДН-40000/35. Вони призначені для живлення секцій власних потреб. Так як трансформатори з розщепленою обмоткою, то секцій – чотири. Всі двигуни дублюються для кожної секції. Їх схема підключення – рис.3.9.

До цієї схеми є дві вимоги:

- 1) забезпечення достатнього рівня напруги на виводах двигуна при пуску;
- 2) допустимі значення струмів коротких замикань на шинах власних потреб.

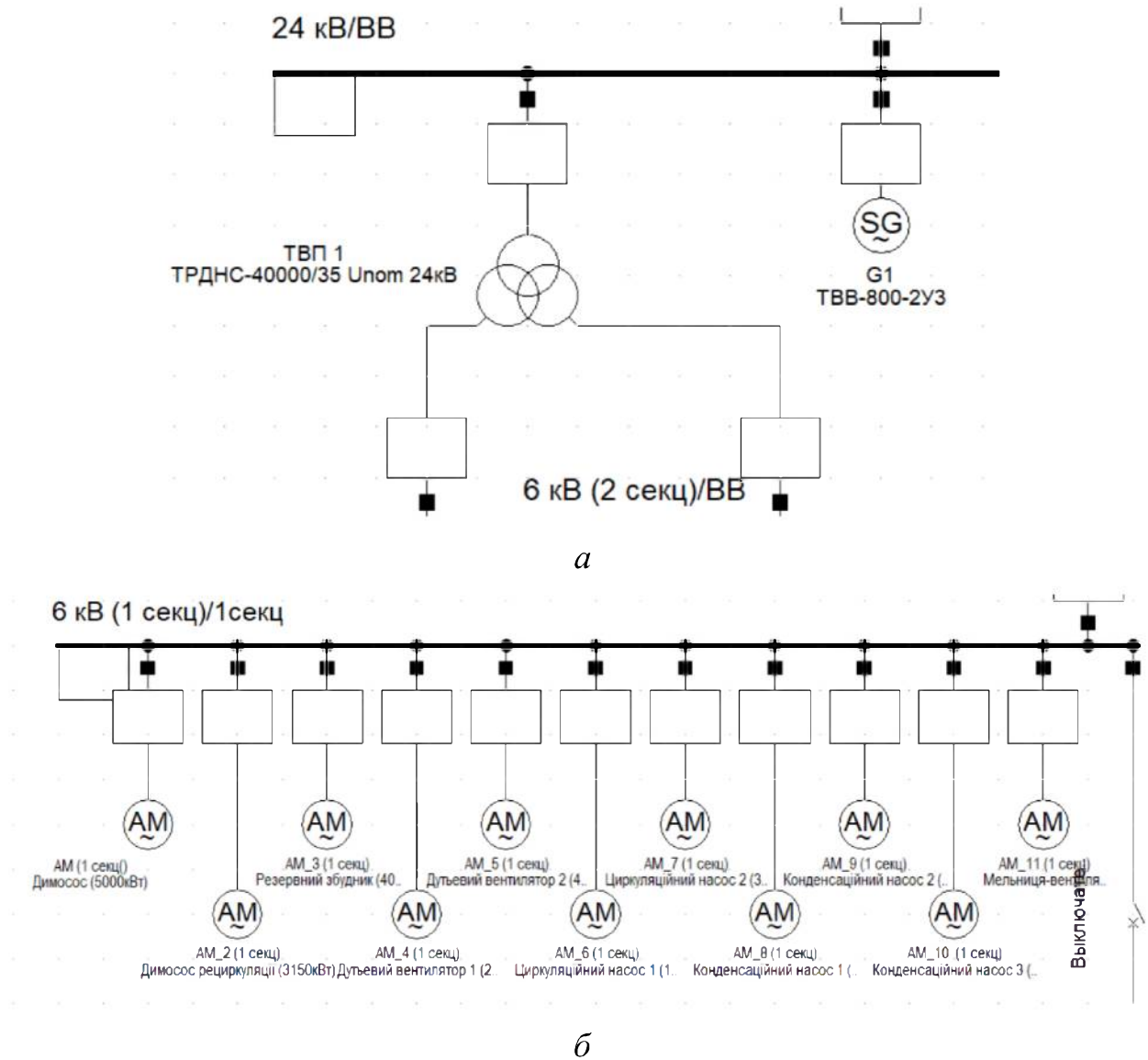


Рисунок 3.9 – Схеми ВП

Тип і кількість двигунів визначається потужністю блоку.

Приклад визначення їх параметрів – це рис. 3.10.

Ном. напряжение kV

Режим ввода

☒ Характеристика момент/ток-скольжение

☐ Эл. параметр

Ном. мощность

☐ Ном. полная мощность kVA

☒ Ном. мех. мощность kW

Ном. коэф. мощности

Эффективность в номинально %

Ном. частота Hz

Ном. скорость rpm

число пар полюсов

Соединение

а

Ротор

☐ Одна обмотка

☒ Двойная обмотка

Кратность пускового тока р.и.

Пусковой момент р.и.

R/X заторм. ротора

Максимальный Момент р.и.

Скольжение при макс.мом

Седловой Момент р.и.

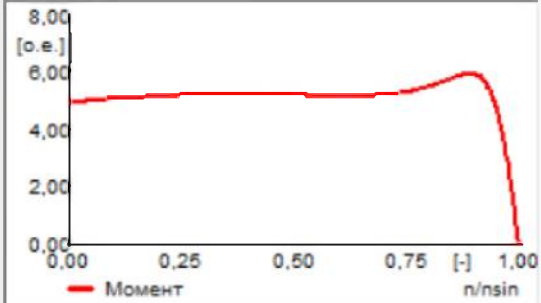
Скольжение при седл.мом

R статора R_s р.и.

Реакт. сопр. статора X_s р.и.

Реакт. сопр. намагн. X_m р.и.

Реакт. утечки ротора X_{tr} р.и.



б

Рисунок 3.10 – Визначення параметрів АД

Вихідні параметри АД наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні данні АД

Тип	P МВт	η в.о.	$\cos \varphi$	$n_{ном}$ об / хв	k_I в.о.	$k_{Мн}$ в.о.	$k_{Мм}$ в.о.
Димосос	5000	97,4	0,92	2985	6,3	1,3	2,6
Димосос рециркуляції	3150	97,2	0,9	2976	5,3	0,9	2,1
Резервний збудник	4000	96,9	0,92	2985	6,3	1,3	2,6
Дутьовий вентилятор №1	2000	96,5	0,91	2965	4,8	0,8	2,1
Дутьовий вентилятор №2	4000	96,9	0,92	2985	6,3	1,3	2,6
Циркуляційний насос №1	1600	96,5	0,9	2975	5,5	1,3	2,1
Циркуляційний насос №2	3150	97,2	0,9	2976	5,3	0,9	2,1
Конденсаційний насос №1	400	95,3	0,91	2980	7	1,3	2,4
Конденсаційний насос №2	400	95,3	0,91	2980	7	1,3	2,4
Конденсаційний насос №3	1000	95,8	0,89	2970	5	1,1	1,9
Млин - вентилятор	800	95,8	0,9	2970	5,2	1,1	1,9

Розрахунок параметрів схем заміщення виконується за наведеним нижче алгоритмом (табл. 3.2):

- експлуатаційні параметри АД

$$s_H = \frac{n_c - n_H}{n_c}$$

$$\eta'_H = 1 - s_H - \frac{\eta_H \cdot \cos \varphi_H \cdot s_H}{1 - s_H}$$

$$\cos \varphi'_H = \frac{\eta_H \cdot \cos \varphi_H}{\eta'_H}$$

- опір розсіювання обмотки статора

$$x_\sigma = \frac{1}{(2 \div 3) \cdot k_I}$$

- для характеристики взаємодукції

$$i_{ad} = \sin \varphi'_H - \left(k_{MH} - \sqrt{k_{MH}^2 - 1} \right) \cdot \cos \varphi'_H$$

$$x_{ad} = \frac{1}{i_{ad}} - x_{\sigma}$$

- для еквівалентних опорів контурів

$$\left. \begin{aligned} r_{ex.H} &= \cos \varphi'_H \\ x_{ex.H} &= \sin \varphi'_H \end{aligned} \right\}$$

Таблиця 3.2 – Розрахунок параметрів АД

Тип АД	s_H	η'_H	$\cos \varphi'_H$	i_{ad}
	-	-	-	B.O.
Димосос	0,0050	0,99	0,91	0,233
Димосос рециркуляції	0,0080	0,985	0,89	0,23
Резервний збудник	0,0050	0,991	0,9	0,256
Дутьовий вентилятор №1	0,0117	0,978	0,9	0,208
Дутьовий вентилятор №2	0,0050	0,991	0,9	0,256
Циркуляційний насос №1	0,0083	0,984	0,88	0,252
Циркуляційний насос №2	0,0080	0,985	0,89	0,23
Конденсаційний насос №1	0,0067	0,987	0,88	0,283
Конденсаційний насос №2	0,0067	0,987	0,88	0,283
Конденсаційний насос №3	0,0100	0,981	0,87	0,246
Млин – вентилятор	0,0100	0,981	0,88	0,225

Продовження табл. 3.2 – Розрахунок параметрів АД

Тип	$r_{ex.H}$	$x_{ex.H}$	$r_{ex.1}$	$x_{ex.1}$	$g_{r.H}$	$b_{r.H}$	$g_{r_{i-1}}$	$b_{r_{i-1}}$	$g_{r.2}$	$b_{r.2}$
	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.
Димосос	0,910	0,415	0,036	0,156	0,953	0,145	2,679	8,666	2,474	2,262
Димосос рециркуляції	0,890	0,456	0,037	0,187	0,946	0,188	1,788	7,413	1,592	2,470
Резервний збудник	0,900	0,436	0,035	0,156	0,944	0,145	2,607	8,690	2,409	2,407
Дутьовий вентилятор №1	0,900	0,436	0,044	0,206	0,962	0,186	1,630	6,704	1,312	1,569
Дутьовий вентилятор №2	0,900	0,436	0,035	0,156	0,944	0,145	2,607	8,690	2,409	2,407
Циркуляційний насос №1	0,880	0,475	0,047	0,178	0,936	0,189	2,548	7,448	2,338	2,626
Циркуляційний насос №2	0,890	0,456	0,037	0,187	0,946	0,188	1,788	7,413	1,592	2,470
Конденсаційний насос №1	0,880	0,475	0,031	0,141	0,924	0,165	2,630	9,779	2,430	4,439
Конденсаційний насос №2	0,880	0,475	0,031	0,141	0,924	0,165	2,630	9,779	2,430	4,439
Конденсаційний насос №3	0,870	0,493	0,049	0,196	0,934	0,212	2,147	6,853	1,960	2,532
Млин – вентилятор	0,880	0,475	0,047	0,188	0,940	0,216	2,210	7,177	2,025	2,875

$$r_{ex.1} = r_{\sigma} + \frac{1,01 \cdot m_n \cdot \cos \varphi'_n \cdot \eta'_n}{(0,99 \cdot k_T)^2 \cdot (1 - s_n)}$$

$$x_{ex.1} = \sqrt{\frac{1}{(0,99 \cdot k_T)^2} - r_{ex.1}^2}$$

Продовження табл. 3.2 – Розрахунок параметрів АД

Тип	r_{σ}	x_{σ}	x_{ad}	r_{r1}	x_{r1}	r_{r2}	x_{r2}
	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.	В.О.
Димосос	0,0050	0,053	4,239	0,005	0,156	0,220	0,201
Димосос рециркуляції	0,0080	0,063	4,285	0,008	0,202	0,184	0,286
Резервний збудник	0,0050	0,053	3,853	0,005	0,159	0,208	0,208
Дутьовий вентилятор №1	0,0117	0,069	4,739	0,012	0,194	0,314	0,375
Дутьовий вентилятор №2	0,0050	0,053	3,853	0,005	0,159	0,208	0,208
Циркуляційний насос №1	0,0083	0,061	3,907	0,009	0,207	0,189	0,212
Циркуляційний насос №2	0,0080	0,063	4,285	0,008	0,202	0,184	0,286
Конденсаційний насос №1	0,0067	0,048	3,486	0,007	0,187	0,095	0,173
Конденсаційний насос №2	0,0067	0,048	3,486	0,007	0,187	0,095	0,173
Конденсаційний насос №3	0,0100	0,067	3,998	0,010	0,231	0,191	0,247
Млин – вентилятор	0,0100	0,064	4,38	0,010	0,232	0,164	0,232

$$\left. \begin{aligned} g_{r,n} &= \frac{r_{ex,n} - r_{\sigma}}{(r_{ex,n} - r_{\sigma})^2 + (x_{ex,n} - x_{\sigma})^2} \\ b_{r,n} &= \frac{x_{ex,n} - x_{\sigma}}{(r_{ex,n} - r_{\sigma})^2 + (x_{ex,n} - x_{\sigma})^2} - \frac{1}{x_{ad}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} g_{r_{i-1}} &= \frac{r_{ex,1} - r_{\sigma}}{(r_{ex,1} - r_{\sigma})^2 + (x_{ex,1} - x_{\sigma})^2} \\ b_{r_{i-1}} &= \frac{x_{ex,1} - x_{\sigma}}{(r_{ex,1} - r_{\sigma})^2 + (x_{ex,1} - x_{\sigma})^2} - \frac{1}{x_{ad}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} g_{r2} &= g_{r_{i-1}} - \frac{r_{r1}}{r_{r1}^2 + x_{r1}^2} \\ b_{r2} &= b_{r_{i-1}} - \frac{x_{r1}}{r_{r1}^2 + x_{r1}^2} \end{aligned} \right\}$$

Таким чином для остаточної схеми заміщення

$$\left. \begin{aligned} r_{r1} &= \frac{g_{r.H}}{g_{r.H}^2 + b_{r.H}^2} \cdot s_H \\ x_{r1} &= \frac{b_{r.H}}{g_{r.H}^2 + b_{r.H}^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} r_{r2} &= \frac{g_{r2}}{g_{r2}^2 + b_{r2}^2} \\ x_{r2} &= \frac{b_{r2}}{g_{r2}^2 + b_{r2}^2} \end{aligned} \right\}$$

Для моменту обертання:

$$\left. \begin{aligned} M_{оберт} &= \frac{2M_{макс} \cdot \left(1 + \frac{r_{\sigma} \cdot s_{кп}}{r_r \cdot c_1} \right)}{\frac{s_{кп}}{s} + \frac{s}{s_{кп}} + \frac{2 \cdot r_{\sigma} \cdot s_{кп}}{r_r \cdot c_1}} \\ c_1 &= 1 + \frac{x_{\sigma}}{x_{ад}} \end{aligned} \right\}$$

Далі використовуючи спрощення отримуємо вираз, який дозволяє визначити критичне ковзання:

$$\left. \begin{aligned} s &= s_H \\ c_2 &= \frac{2 \cdot r_{\sigma} \cdot s_H}{r_{r1} \cdot c_1} \\ M &= M_{ном} \\ s_{кп} &= \frac{k_{Мн} + \sqrt{k_{Мн}^2 - 1 - c_2 \cdot (1 - k_{Мн})}}{1 + c_2 \cdot (1 - k_{Мн})} \cdot s_H \end{aligned} \right\}$$

Таким чином, можна визначити пускові характеристики АД.

Спочатку визначаються провідності (рис. 3.11 - 3.14):

$$g_r(s) = \frac{\frac{r_{r1}}{s}}{\left(\frac{r_{r1}}{s}\right)^2 + x_{r1}^2} + \frac{\frac{r_{r2}}{s}}{\left(\frac{r_{r2}}{s}\right)^2 + x_{r2}^2}$$

$$b_r(s) = \frac{x_{r1}}{\left(\frac{r_{r1}}{s}\right)^2 + x_{r1}^2} + \frac{x_{r2}}{\left(\frac{r_{r2}}{s}\right)^2 + x_{r2}^2} + \frac{1}{x_{ad}}$$

Потім визначаються опори (рис. 3.15):

$$r_{ex}(s) = r_{\sigma} + \frac{g_r(s)}{g_r^2(s) + b_r^2(s)}$$

$$x_{ex}(s) = x_{\sigma} + \frac{b_r(s)}{g_r^2(s) + b_r^2(s)}$$

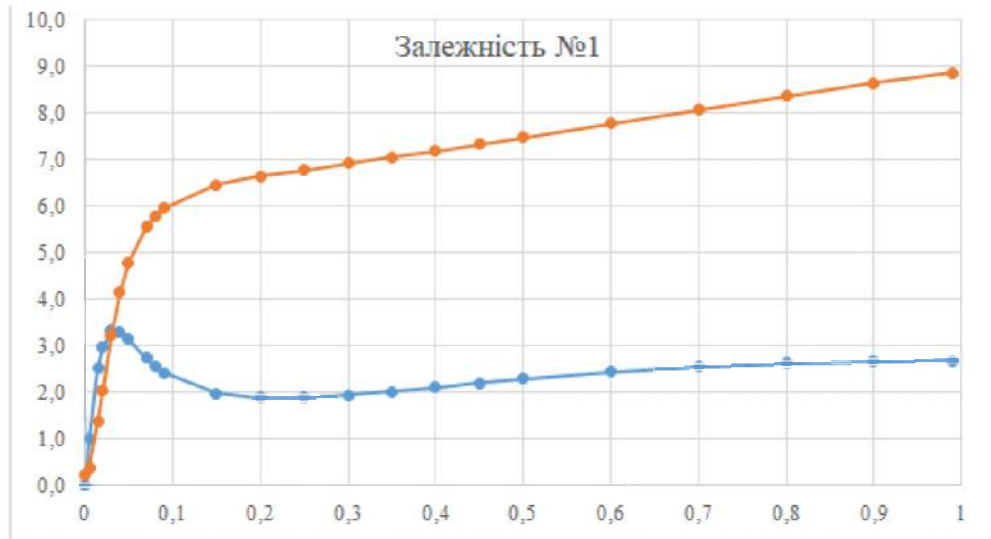
Отже функція струму від ковзання визначається (рис. 3.16):

$$I(s) = \frac{1}{\sqrt{r_{ex}(s)^2 + x_{ex}(s)^2}}$$

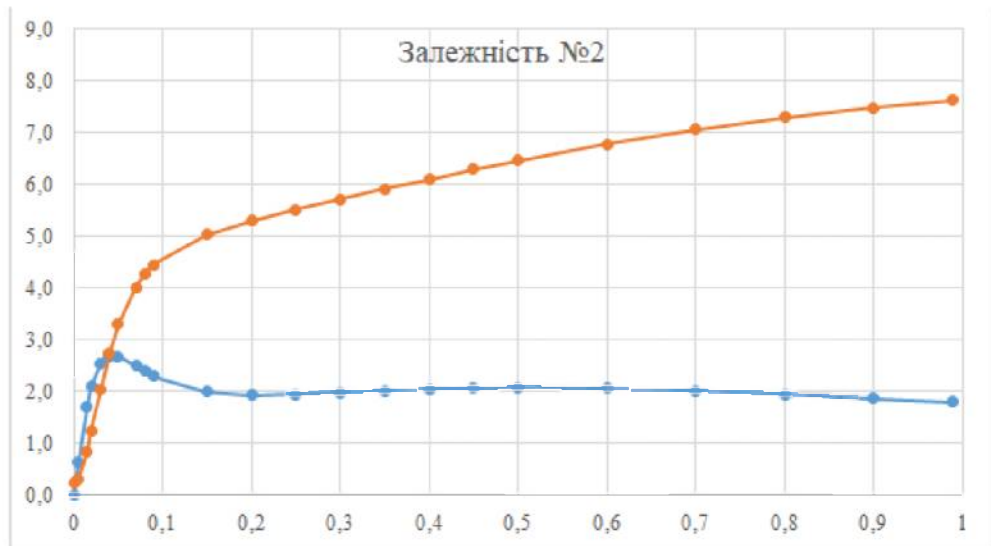
Функція моменту обертання (рис. 3.17 – 3.18):

$$M(s) = I^2(s) \cdot (r_{ex}(s) - r_{\sigma}) \cdot \frac{1 - s_H}{\cos \varphi'_H \cdot \eta'_H}$$

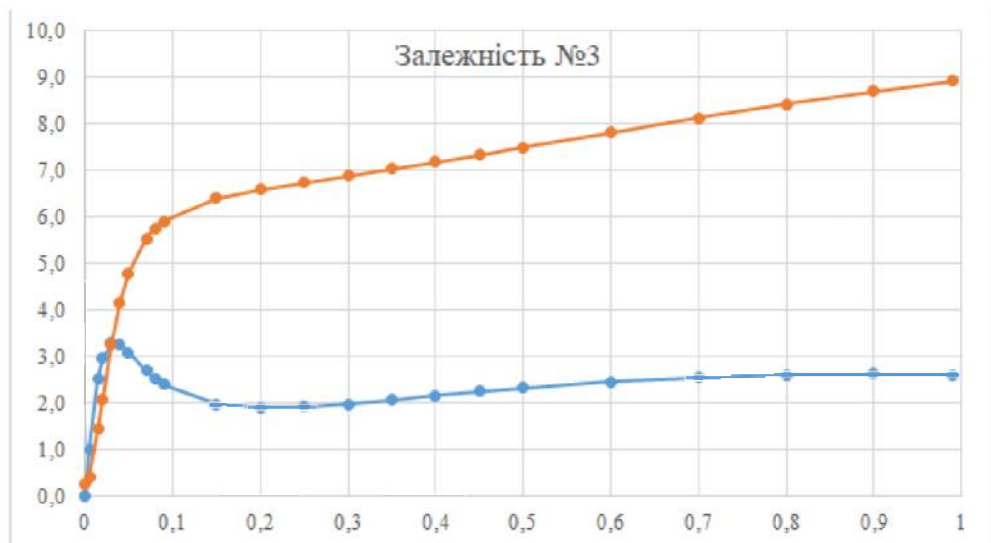
$$M(s)_{K7} = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}}$$



а

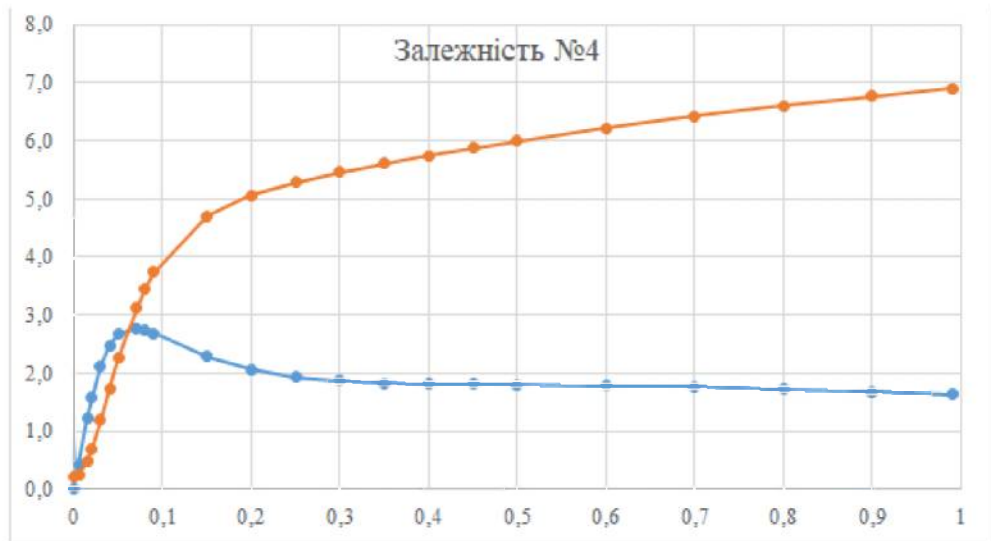


б

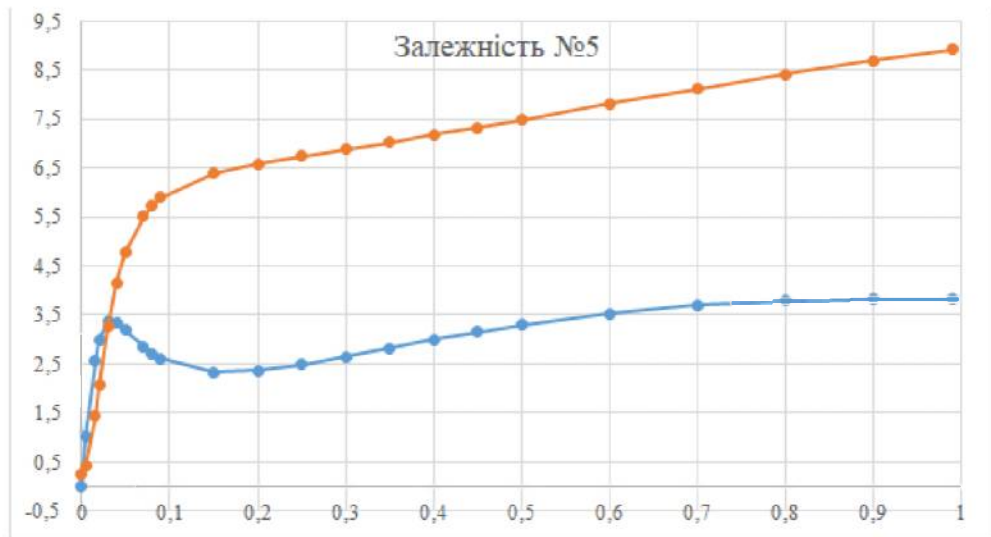


в

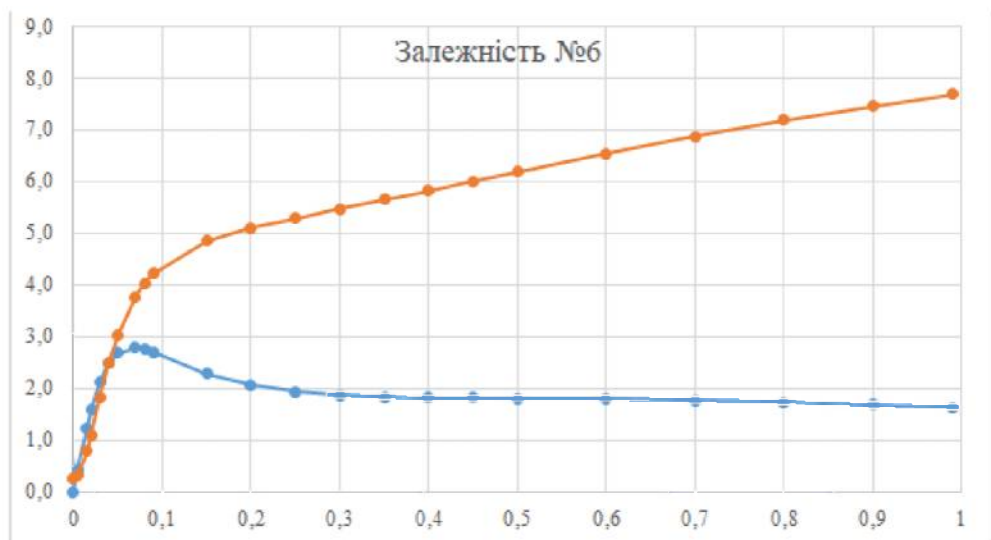
Рисунок 3.11 – Залежності $g_r(s)$ і $b_r(s)$ для АД1 – АД3



а

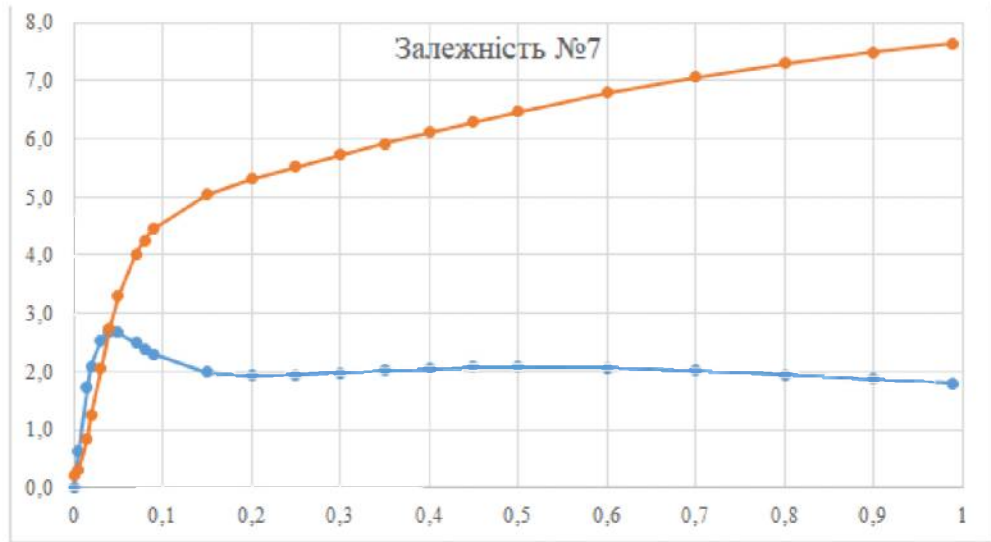


б

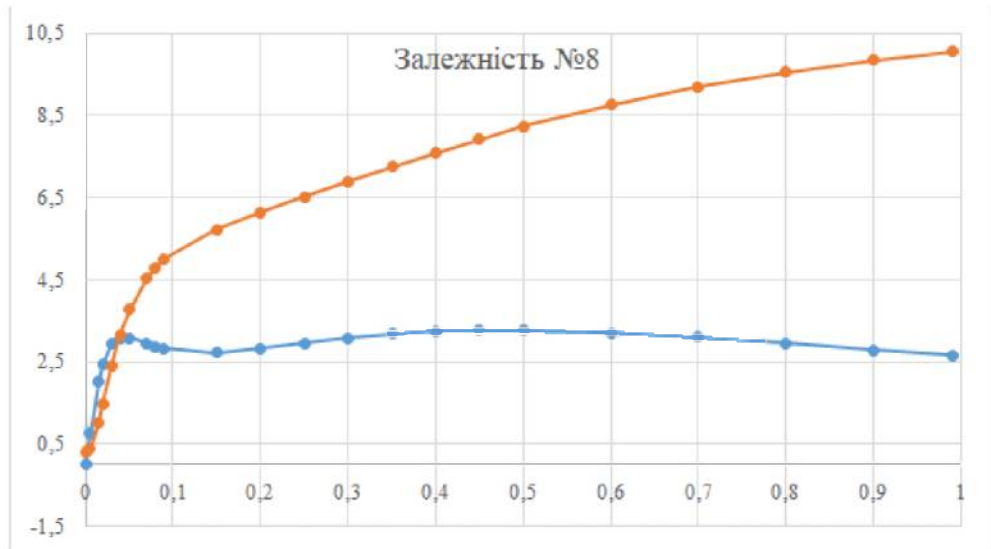


в

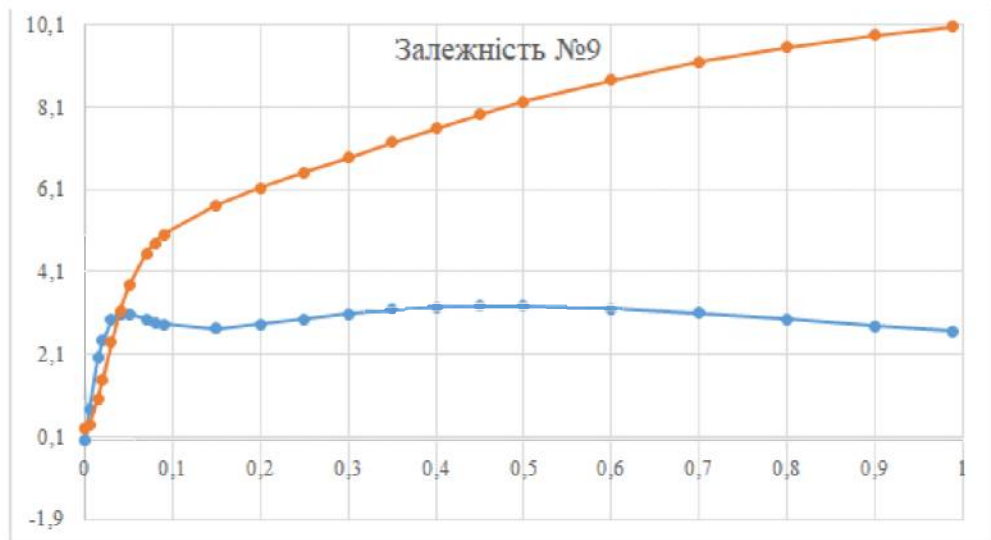
Рисунок 3.12 – Залежності $g_r(s)$ і $b_r(s)$ для АД4 – АД6



а

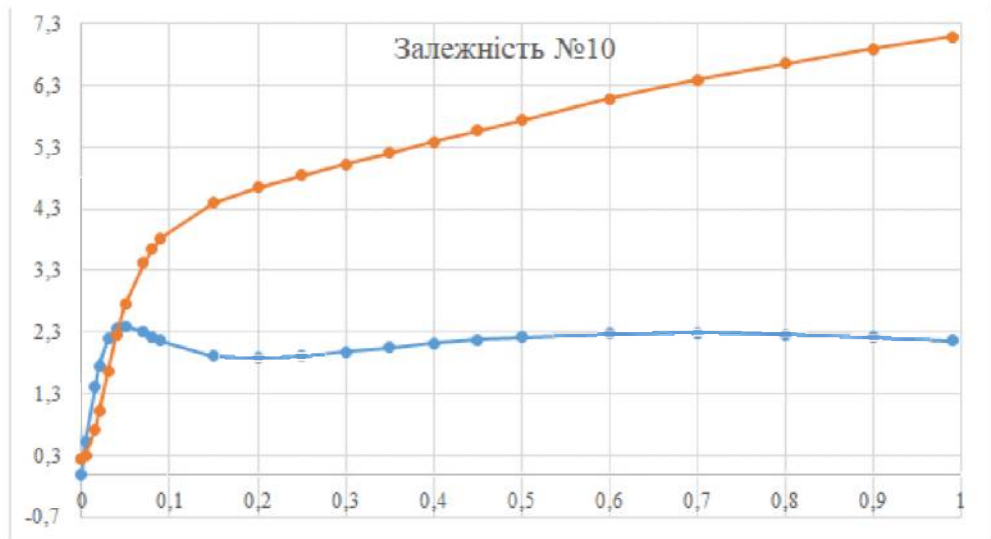


б

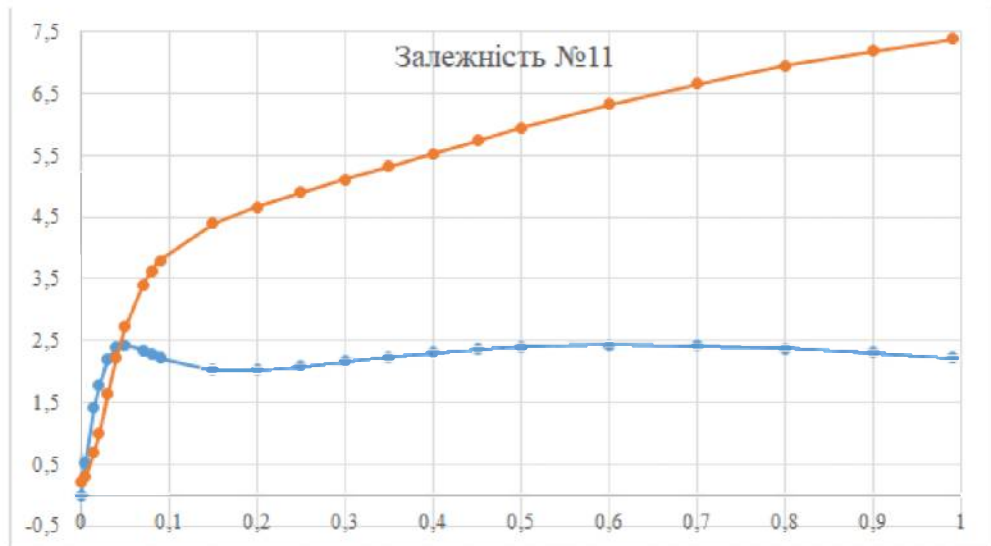


в

Рисунок 3.13 – Залежності $g_r(s)$ і $b_r(s)$ для АД7 – АД9



а



б

Рисунок 3.14 – Залежності $g_r(s)$ і $b_r(s)$ для АД10 – АД11

Аналіз отриманих характеристик (рис. 3.11 - 3.14) показав, що в діапазоні ковзання $s = 0 \div 1$ відхилення від середнього значення $g_{r\text{cp}}(s)$ максимального значення $g_{r\text{max}i}(s)$ складає від 10,4 % до 64,1 %:

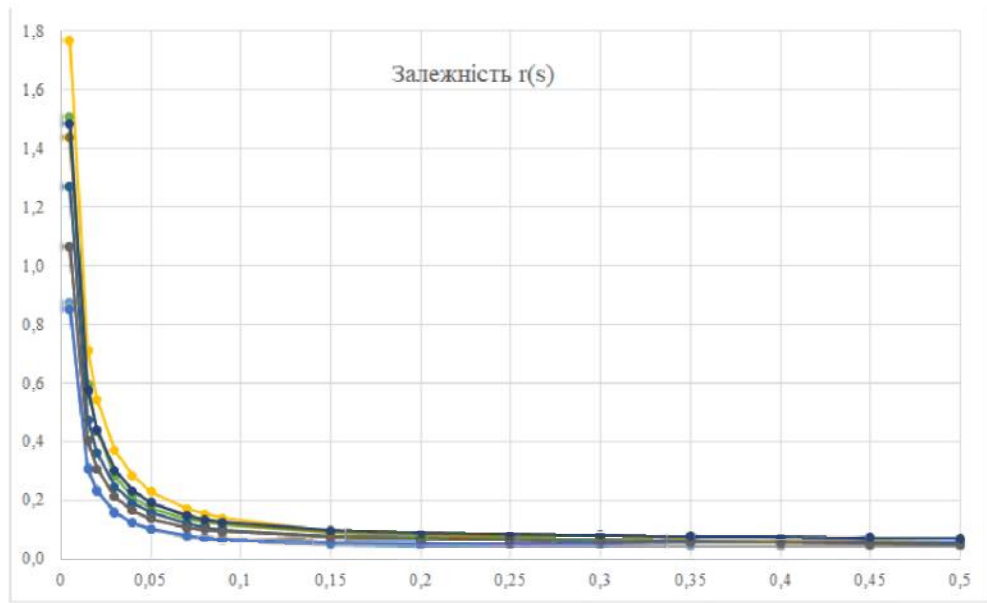
$$\delta g = \frac{g_{r\text{cp}}(s) - g_{r\text{max}i}(s)}{g_{r\text{cp}}(s)} \cdot 100$$

а для максимального значення $b_r(s)$ – складає від 0,3 % до 10,05 %:

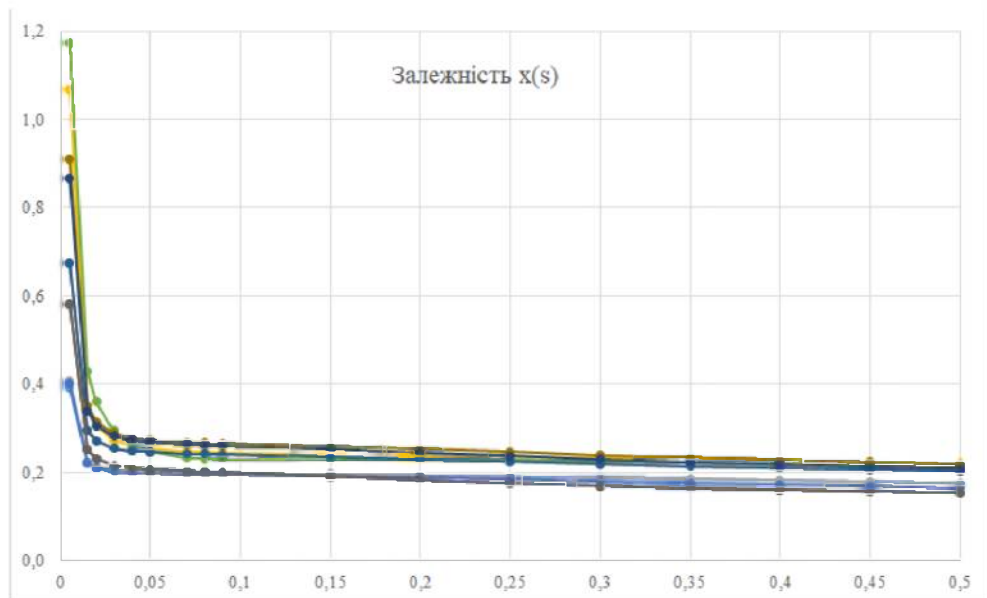
$$\delta b = \frac{b_{r\text{cp}}(s) - b_{r\text{max}i}(s)}{b_{r\text{cp}}(s)} \cdot 100$$

Відхилення від середнього значення $g_{r\text{cp}}(s)$ мінімального значення $g_{r\text{mini}}(s)$ складає від 12,8 % до 38,6 %, а для мінімального значення $b_{r\text{mini}}(s)$ – складає від 15,3 % до 50,1 %.

Отже еквівалентувати двигуни середніми характеристиками є недопустимим через велику похибку усереднення.

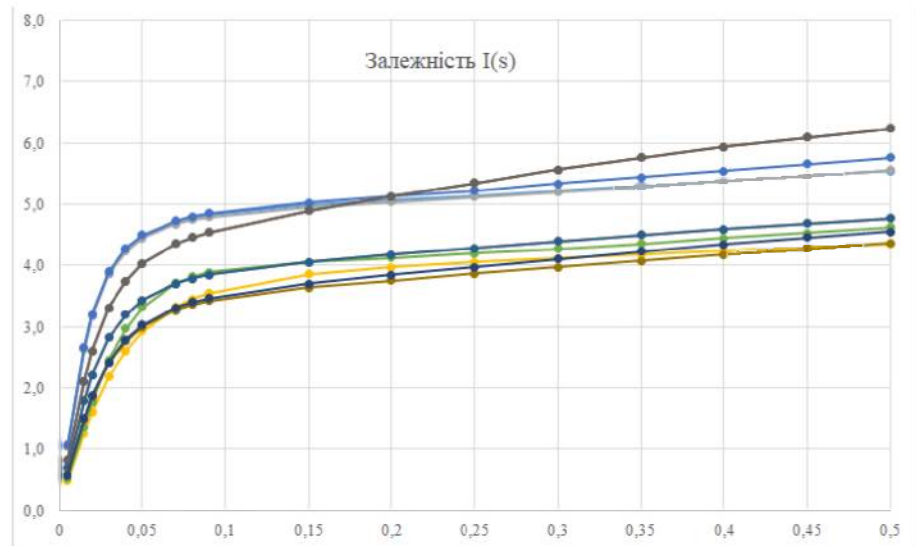
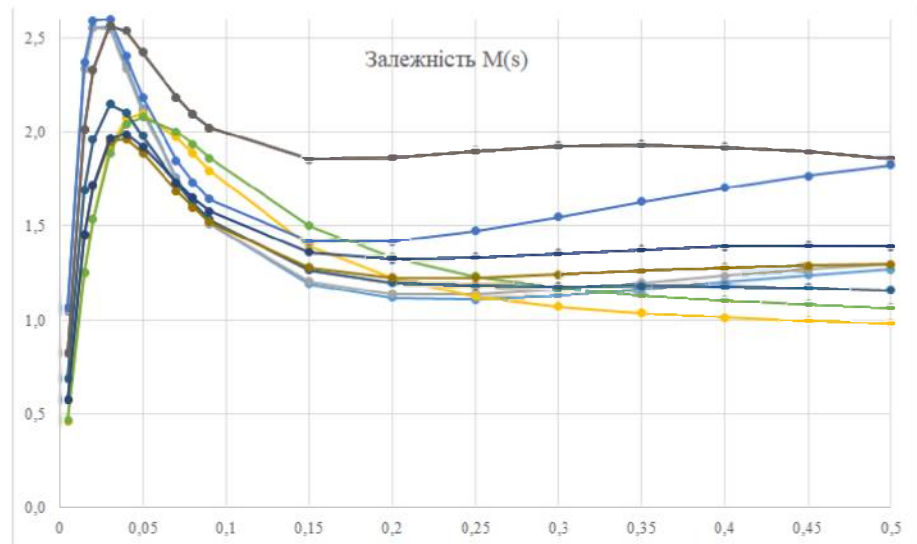
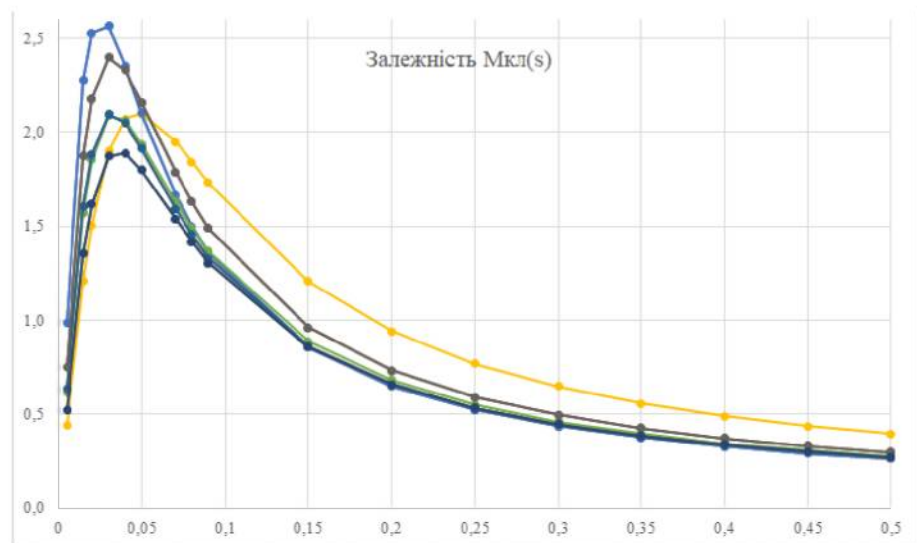


а



б

Рисунок 3.15 – Залежності $r_{ex}(s)$ і $x_{ex}(s)$ для АД1 – АД11

Рисунок 3.16 – Залежності $I(s)$ для АД1 – АД11Рисунок 3.17 – Залежності $M(s)$ для АД1 – АД11Рисунок 3.18 – Залежності $M_{кл}(s)$ для АД1 – АД11

Нижче наведений алгоритм, який реалізує розрахунок $\omega = f(t)$ в процесі самозапуску двигунів власних потреб електростанцій, а також зміни напруги $U_{c.з.} = f(t)$ (рис. 3.19).

```

f(W) :=  $\left\{ \begin{array}{l} a \leftarrow \text{cols}(W) \\ j \leftarrow a \\ fl \leftarrow 0 \\ q \leftarrow 0 \\ \text{while } fl = 0 \\ \quad q \leftarrow q + 1 \text{ if } \min(W^{(j)}) > 0.95 \\ \quad fl \leftarrow 1 \text{ if } (q \cdot dt) > 1 \\ \quad \text{break if } (j - a) \cdot dt \geq t_{sz} \\ \quad Yd \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } k \in 1..N_{dv} \\ \quad \quad Yd \leftarrow Yd + \frac{I(1 - W_{k,j,k}) \cdot I_{n_k}}{U_f} \\ \quad X_{sz_j} \leftarrow \frac{1}{Yd} \\ \quad I_{sz_j} \leftarrow U \cdot Yd \cdot U_{fk} \\ \quad U_{sz_j} \leftarrow U \cdot \frac{X_{sz_j}}{X_{sz_j} + X_v} \\ \quad \text{for } i \in 1..N_{dv} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} W_{i,j} \leftarrow \begin{cases} 0.001 & \text{if } W_{i,j} \leq 0 \\ W_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \\ mv \leftarrow m(1 - W_{i,j,i}) \cdot (U_{sz_j})^2 \\ ms \leftarrow Mc(K_{z_i}, W_{i,j}, n_i) \\ W_{i,j+1} \leftarrow W_{i,j} + \frac{|mv| - ms}{T_{j_i}} \cdot dt \end{array} \right. \\ \quad j \leftarrow j + 1 \\ \quad \left( \begin{array}{c} W \\ U_{\text{самозапуску}} \\ I_{\text{самозапуску}} \\ X_{\text{самозапуску}} \end{array} \right) \end{array} \right.$ 

```

Рисунок 3.19 – Алгоритм розрахунку процесів самозапуску

Тривалість самозапуску, згідно теорії електричних машин, має обмеження щодо нагріву двигунів, аби забезпечити збереження технології генерації електричної енергії при зменшенні кутової швидкості відповідальних механізмів.

Час знаходиться в обмеженнях 25 - 35 с, якщо на електростанції є поперечні зв'язки.

Час знаходиться в обмеженні 20 с, якщо це блочні електростанції.

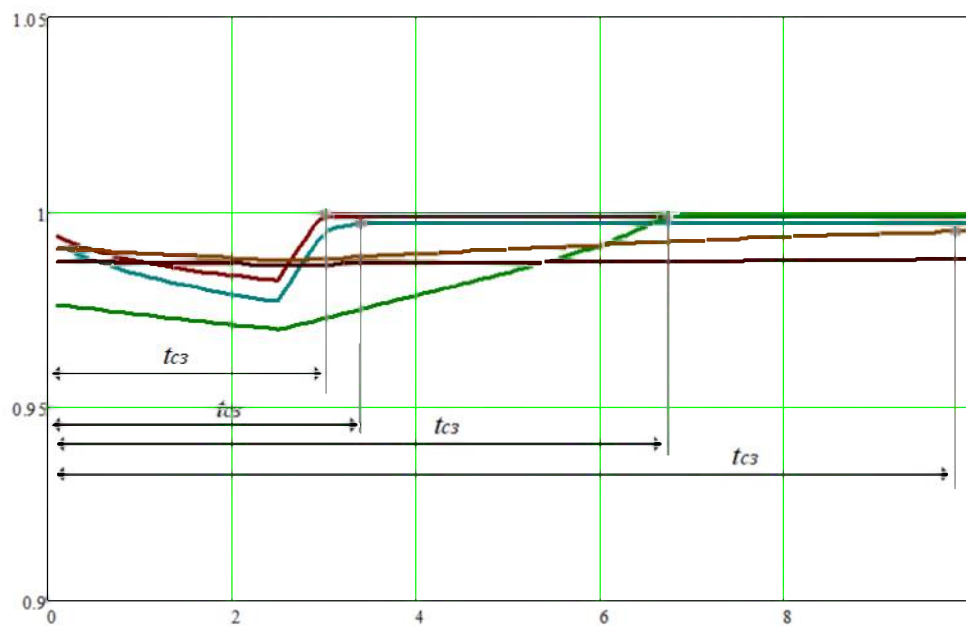


Рисунок 3.20 – Зміна напруги самозапуску

3.2 Усталений режим

У даному підрозділі – це розрахунок усталеного режиму (табл. 3.3-3.5). На рис. 3.21 показана схема з результатами розрахунку.

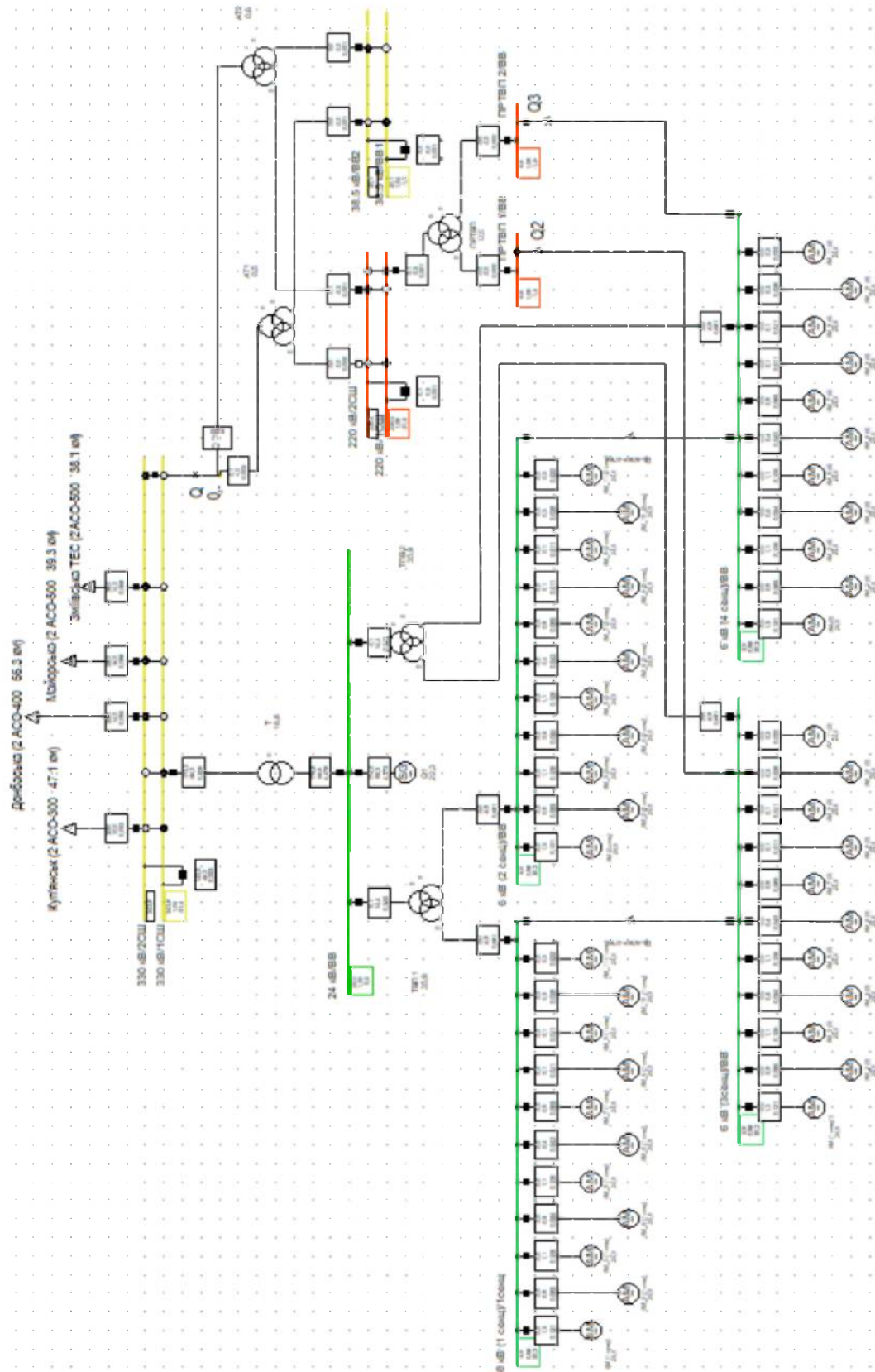


Рисунок 3.21 – Схема нормального режима

Таблица 3.3 – Результаты розрахунку режиму (потужності й струми)

Расчет УР			Полный отчет по системе: Подстанции, Профили напряжений, Межсетевой обмен																	
Расчет УР, каллиейный, эмистрикий, прищл. посл.			Автоматическая адаптация модели екодности								Нет									
АРНТ РПН			Макс. допустимая погрешность УР для								1,00 kVA									
Учитывать предел реакт. мощности			Уровень								0,10 %									
			Уравнений модели																	
Комп.			Актив.			Реактив.			Мощн.			Ток			Загрузка			Доп. данные		
Напр.			Мощн.			Мощн.			коэф.			Ток			Загрузка					
[kV]			[MW]			[Mvar]			[-]			[kA]			[%]					
1220 кВ																				
1СШ 220,00			1,09	239,27	-31,45	-0,03	-0,30	-0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			-0,03	-0,30	-0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			АТ1			-0,00	0,00	-1,00	0,00	0,49	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			ПРТПП			0,03	0,30	0,25	0,00	0,47	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
2СШ 220,00			1,09	239,27	-31,45	0,03	0,30	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			-0,03	-0,30	-0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			АТ2			-0,03	-0,30	-0,25	0,00	0,60	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
24 кВ																				
ВВ 24,00			1,00	24,00	0,00	173,33	95,34	0,35	4,77	22,32	Tap:	31	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Сум			G1			173,80	86,62	0,32	4,48	18,61	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			Т			0,09	14,36	0,01	0,35	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			ТПВ 1			0,09	14,36	0,01	0,35	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			ТПВ 2			0,09	14,36	0,01	0,35	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
330 кВ																				
1СШ 220,00			1,04	243,76	-31,45	30,00	10,00	0,95	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Lod			Куп/мисск (2 АСО-3)			143,25	46,24	0,95	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			-173,25	-56,24	-0,95	0,31	18,61	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			Т																	
2СШ 220,00			1,04	243,76	-31,45	55,00	14,00	0,97	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Lod			ПовБасека (2 АСО-4)			32,00	14,00	0,94	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Lod			Эмйиссека ТЕС (2 А)			50,00	16,00	0,95	0,09	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Lod			Маюурсека (2 АСО-5)			-143,25	-46,24	-0,95	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			0,10	1,01	0,10	0,00	0,49	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			АТ1			0,15	1,22	0,12	0,00	0,60	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			АТ2																	
35,5 кВ																				
ВВ2 28,50			1,04	40,07	-1,45	-0,01	-0,04	-0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			0,01	0,04	0,26	0,00	0,60	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
Ячейка_/Тк2			АТ2																	
ВВ1 28,50			1,04	40,07	-1,45	-0,01	-0,04	-0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ0			0,01	0,04	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			АТ1			-0,01	-0,04	-0,26	0,00	0,49	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
6 кВ (1 секц)																				
ВВ 6,00			0,98	5,89	30,22	-0,00	1,34	-0,00	0,13	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ (1 секц)			-0,00	0,28	-0,00	0,03	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_10 (1 секц)			-0,00	0,22	-0,00	0,02	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_11 (1 секц)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_2 (1 секц)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_3 (1 секц)			-0,00	0,55	-0,00	0,05	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_4 (1 секц)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_5 (1 секц)			-0,00	0,44	-0,00	0,04	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_6 (1 секц)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_7 (1 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_8 (1 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_9 (1 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Cubicle/Coup			СВ13			0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			ТЕП 1			-0,00	-6,95	-0,00	0,68	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
6 кВ (2 секц)																				
ВВ 6,00			0,98	5,89	30,22	-0,00	1,34	-0,00	0,13	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ (2 секц)			-0,00	0,28	-0,00	0,03	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_10 (2 секц)			-0,00	0,22	-0,00	0,02	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_11 (2 секц)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_2 (2 секц)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_3 (2 секц)			-0,00	0,55	-0,00	0,05	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_4 (2 секц)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_5 (2 секц)			-0,00	0,44	-0,00	0,04	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_6 (2 секц)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_7 (2 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_8 (2 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_9 (2 секц)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Cubicle/Coup			СВ7			0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			ТЕП 1			-0,00	-6,95	-0,00	0,68	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
6 кВ (3 секц)																				
ВВ 6,00			0,98	5,89	30,22	-0,00	1,34	-0,00	0,13	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ (3 секц)			-0,00	0,28	-0,00	0,03	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_10 (3)			-0,00	0,22	-0,00	0,02	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_11 (3)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_2 (3)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_3 (3)			-0,00	0,55	-0,00	0,05	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_4 (3)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_5 (3)			-0,00	0,44	-0,00	0,04	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_6 (3)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_7 (3)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_8 (3)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_9 (3)			-0,00	0,11	-0,00	0,01	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Cubicle/Coup			СВ13			0,00	-0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubicle/Coup			СВ14			0,00	-0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ячейка_/Тк2			ТПВ 2			-0,00	-6,95	-0,00	0,68	25,90	Tap:	0,00	Min:	0	Max:	0	0	0	0	0
6 кВ (4 секц)																				
ВВ 6,00			0,98	5,89	30,22	-0,00	1,34	-0,00	0,13	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ (4)			-0,00	0,28	-0,00	0,03	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_10 (4)			-0,00	0,22	-0,00	0,02	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_11 (4)			-0,00	0,27	-0,00	0,06	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп			АМ_2 (4)			-0,00	1,08	-0,00	0,11	24,04	Slip:	0,00 %	хм:	4,00 p.u.						
Ячейка_/Лсп																				

Продовження табл. 3.3 – Результати розрахунку режиму (потужності й струми)

Сумма														
Ячейка_ / Тп2		ТПБ 2		-0,00	-€ ,95	-0,00	0,68	25,90	Таб:	0,00	Min:	0	Max:	0
КРТСО 1														
ВВ 6,00		1,09	6,56	-1,44										
Cubicle/ Coup		CB2		0,00	-0,00	1,00	0,00	0,00						
Ячейка_ / Тп2		ПРЕСП		-0,00	-0,00	-1,00	0,00	0,47	Таб:	0,00	Min:	0	Max:	0
КРТСО 2														
ВВ 6,00		1,09	6,56	-1,44										
Cubicle/ Coup		CE2		0,00	-0,00	1,00	0,00	0,00						
Ячейка_ / Тп2		ПРЕСП		-0,00	-0,00	-1,00	0,00	0,47	Таб:	0,00	Min:	0	Max:	0

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку режиму (напруга)

[illegible]

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку режиму (втрати потужності)

Расчет УВ			Поликий отчет по системе: Подстанции, Профили напряжений, Межсетевой обмен							
Расчет УВ, нелинейный, симметричный, прямая посл.			Автоматическая адаптация модели сложности							
АСКТ ЕРН			Нет							
Учитывать принцип реакт. мощности			Макс. допустимая погрешность УВ для							
			Узлов							
			Уравнений модели							
			1,00 kVA							
			0,10 %							
Сеть: Сеть			Статус сист.: Сеть			Исследование: Исследование			Прил.: / 5	
Уров. Напр.	Генерация	Данг. Нагр.	Нагр.	Компенса-ция	Из внешн. сети	Потокообмен	Мощность	Всего	Нагр.	Ненагр.
[kV]	[MW] / [Mvar]	[MW] / [Mvar]	[MW] / [Mvar]	[MW] / [Mvar]	[MW] / [Mvar]	с	Потокообмен [MW] / [Mvar]	Потери [MW] / [Mvar]	Потери [MW] / [Mvar]	Потери [MW] / [Mvar]
6,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
	0,00	27,72	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
						24,00 kV	0,42	0,10	0,02	0,02
							-26,76	0,50	0,06	0,44
						220,00 kV	0,44	0,00	-0,00	0,02
							0,80	0,00	-0,20	0,30
24,00	172,92	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
	95,34	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
						6,00 kV	-0,22	0,10	0,02	0,02
							27,26	0,50	0,06	0,44
						230,00 kV	173,80	0,55	0,08	0,42
							66,62	10,29	4,96	5,42
220,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
						220,00 kV	-0,02	0,00	-0,09	0,09
							-0,09	0,00	-0,97	0,97
						230,00 kV	0,12	0,00	-0,09	0,09
							0,67	0,00	-0,97	0,97

Продовження табл. 3.5 – Результати розрахунку режиму (втрати потужності)

220,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
						6,00 kV	-0,44	0,00	-0,08	0,02
							-0,80	0,00	-0,20	0,30
						33,50 kV	0,02	0,00	-0,09	0,09
							0,09	0,00	-0,97	0,97
						220,00 kV	-0,67	0,00	-0,09	0,09
							-4,77	0,00	-0,97	0,97
320,00	0,00	0,00	173,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	54,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00
						24,00 kV	-173,25	0,55	0,08	0,42
							-56,24	10,29	4,96	5,42
						33,50 kV	-0,12	0,00	-0,09	0,09
							-0,67	0,00	-0,97	0,97
						220,00 kV	0,67	0,00	-0,09	0,09
							4,77	0,00	-0,97	0,97
Zero:	172,98	-0,00	173,00	0,00	0,00		0,00	0,98	0,18	0,20
	95,34	27,79	54,00	0,00	0,00		0,00	13,56	5,46	5,10

3.3 Сталий режим КЗ

Сталий режим трифазного КЗ – це стадія перехідного процесу після затухання вільних складових струмів КЗ при відсутності дії АРВ. Такий режим є умовним, так як він виникає лише за умови автономної ізолюваної роботи генератора.

Сталий режим трифазного КЗ зазвичай розглядається за умови, що генератор є ненасиченим, його навантаження має індуктивний характер, його ротор обертається з постійною синхронною швидкістю, напруга обмотки збудження є постійною.

Таким чином:

$$\left. \begin{array}{l} i_q, i_d, i_f = \text{const} \\ i_{D_i}, i_{Q_j}, i_0 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d\Psi}{dt} = 0$$

Система рівнянь (2.24) прийме вид:

$$\left. \begin{array}{l} u_d = -\Psi_q - r \cdot i_d \\ u_q = \Psi_d - r \cdot i_q \\ u_f = r \cdot i_f \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Вирази для потокозчеплення приймуть вид:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \approx x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f \\ \Psi_q &= x_q \cdot i_q + \sum_{j=1}^m x_{aq} \cdot i_{Q_j} \approx x_q \cdot i_q \\ \Psi_f &= x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \approx x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f \end{aligned} \right\}$$

Таким чином система рівнянь (3.1) приймуть вид:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\Psi_q - r \cdot i_d = -x_q \cdot i_q - r \cdot i_d \\ u_q &= \Psi_d - r \cdot i_q = x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f - r \cdot i_q \\ u_f &= r \cdot i_f \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

У векторній формі система рівнянь (3.2) з урахуванням від'ємного напрямку осі d

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_d &= -x_q \cdot \underline{i}_q - r \cdot \underline{i}_d \\ \underline{u}_q &= -x_d \cdot \underline{i}_d + \underbrace{x_{ad} \cdot \underline{i}_f}_{\underline{E}_q} - r \cdot \underline{i}_q \\ \underline{u}_f &= r \cdot \underline{i}_f \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

З рівняння (3.3) ми бачимо, що струм збудження $\underline{i}_f$ наводить в обмотці статора $\underline{E}_q$, яка відстає від $\underline{\Psi}_{adf}$ на кут $\frac{\pi}{2}$, і тому направлена по осі q :

$$\underline{E}_q = \underline{u}_q + x_d \cdot \underline{i}_d + r \cdot \underline{i}_q \quad (3.4)$$

Для першої двох рівнянь системи (3.3) є справедливим наступний крок:

$$\underline{u}_d + j\underline{u}_q = -x_q \cdot \underline{i}_q - r \cdot \underline{i}_d + j(-x_d \cdot \underline{i}_d + \underline{E}_q - r \cdot \underline{i}_q)$$

$$\underline{u} = j\underline{E}_q - r \cdot (\underline{i}_d + j\underline{i}_q) - x_q \cdot \underline{i}_q - jx_d \cdot \underline{i}_d$$

$$\underline{u} = j\underline{E}_q - r \cdot \underline{i} - x_q \cdot \underline{i}_q - jx_d \cdot \underline{i}_d \quad (3.5)$$

$$j\underline{E}_q = \underbrace{\underline{u} + r \cdot \underline{i} + x_q \cdot \underline{i}_q}_{\underline{E}_Q} + jx_d \cdot \underline{i}_d$$

Якщо не враховувати активний опір, то векторна діаграма буде мати вигляд, який показаний на рис. 3.22.

На рис. 3.22 позначена фіктивна ЕРС, яка в свою чергу залежить від конструкції електричної машини:

$$\left. \begin{aligned} x_d \neq x_q &\Rightarrow \underline{E}_q = \underline{E}_Q + j\underline{i}(x_d - x_q) \\ x_d = x_q &\Rightarrow \underline{E}_q = \underline{E}_Q \end{aligned} \right\}$$

Далі аналізуємо струми трифазного – табл.3.6 - 3.7, і однофазного КЗ – табл. 3.8.

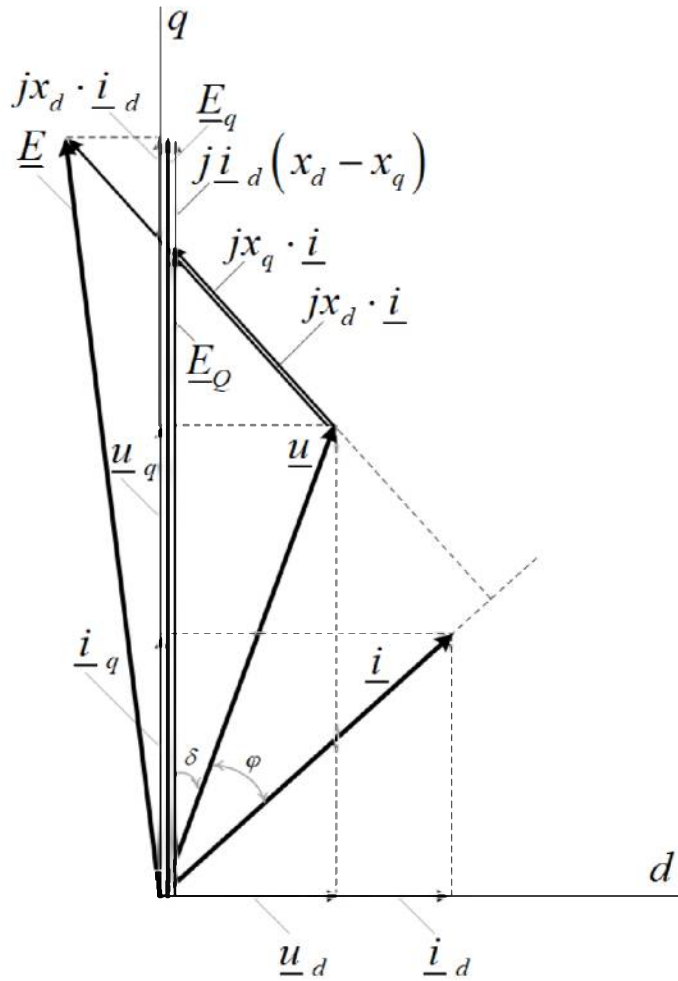


Рисунок 3.22 – Векторна діаграма СМ

Таблица 3.6 – Завдання вихідних параметрів КЗ

Метод	МІМЕ ОМБ2	Издание	2001
Повреждение	3-фазное КЗ		
Рассчитать	Макс. токи КЗ		
Макс. доп. откл. напр. для сетей НН	6	%	
Длительность короткого замыкания			
Время откл.	0.25	с	Исп. время откл.
Время КЗ (th)	1.	с	общее
Сопротивление повреждения			
☐ Детальное определение сопротивления в месте повреждения			
Активное, Rf	0.	Ohm	
Реактивное, Xf	0.	Ohm	
Место повреждения			
В	Определено пользователем		
Выбрать	▼ ▲		
☒ Показать Окно результатов			
Команда	+ ния\Исследование\Вывод результатов		
Показывает	Места повреждений с фидерами		

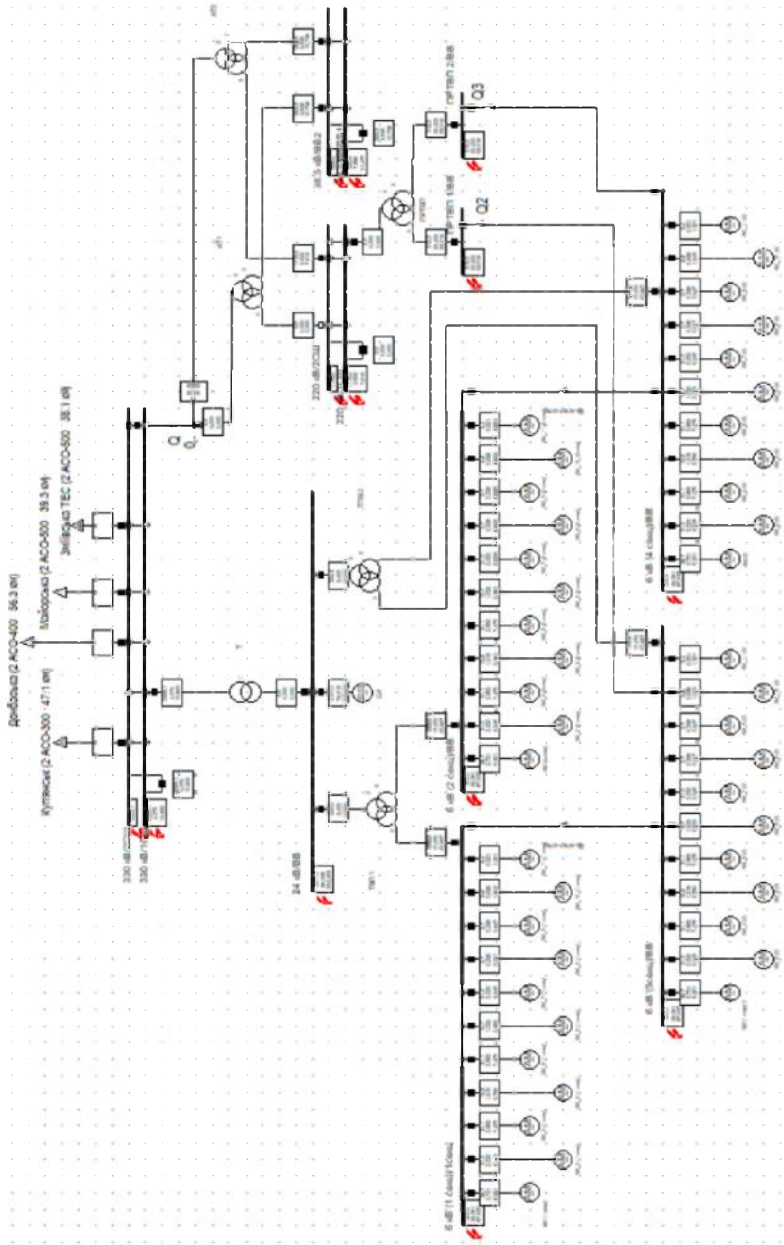


Рисунок 3.23 – Схема аварийного режима

Таблица 3.7 – Результаты розрахунку режиму (струми КЗ)

Места повреждений с фидерами		Расчет КЗ		/ Метод : VDE 0102		3-фазное КЗ		/ Макс. токи КЗ				
Асинхронные двигатели Всегда учитывать		Идентификация сети Автоматически		Длительность короткого замыкания Время откл.		0,25 с						
Апериодическая составляющая {idc}		Температура проводника		Время КЗ (Ith)		1,00 с						
Используя метод В		Предопределена пользователем		Коэф. напряжения с		Предопределен пользователем		Нет				
Сеть: Сеть		Стадия сист.: Сеть		Прил.:		/ 1						
	Ном.У. [kV]	Напр. [kV]	с- [deg]	Коэф.	Sk" [MVA/MBA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
220 кВ												
1СШ	220,00	0,00	0,00	1,10	1113,37 MVA	2,92 kA	-88,60	7,81 kA	2,92	1113,37	2,57	3,05
СВ0	T1				1113,37 MVA	2,92 kA	91,40	7,81 kA				
АТ1	Терминал	38.5 кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
ПРТП	ПРТП 1	ПРТП 2			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
2СШ												
2СШ	220,00	0,00	0,00	1,10	1113,37 MVA	2,92 kA	-88,60	7,81 kA	2,92	1113,37	2,57	3,05
СВ0	T0				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
АТ2	Терминал	38.5 кВ			1113,37 MVA	2,92 kA	91,40	7,81 kA				

Продовження табл. 3.7 – Результати розрахунку режиму (струми КЗ)

24 кВ													
БВ	24,00	0,00	0,00	1,10	3577,39 MVA	86,06 kA	-89,05	224,40 kA	66,99	2784,76	75,32	88,56	
Т	330 кВ				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ТБП 1	6 кВ (1 се	6 кВ (2 се			224,46 MVA	5,40 kA	96,62	14,08 kA					
ТБП 2	6 кВ (3сек	6 кВ (4 се			224,46 MVA	5,40 kA	96,62	14,08 kA					
G1					3130,97 MVA	75,32 kA	-89,86	196,40 kA					
330 кВ													
ICB	330,00	0,00	0,00	1,10	2329,13 MVA	4,07 kA	-89,10	10,82 kA	3,78	2161,39	3,59	4,23	
СВ0	T1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
T	24 кВ				2329,13 MVA	4,07 kA	90,90	10,82 kA					
2СВ	330,00	0,00	0,00	1,10	2329,13 MVA	4,07 kA	-89,10	10,82 kA	3,78	2161,39	3,59	4,23	
СВ0	T0				2329,13 MVA	4,07 kA	90,90	10,82 kA					
AT1	220 кВ	38,5 кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
AT2	220 кВ	38,5 кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
38,5 кВ													
ВВ2	38,50	0,00	0,00	1,10	526,52 MVA	7,90 kA	-88,82	21,48 kA	7,90	526,52	6,95	8,38	
AM_10 (3)					6,84 MVA	0,66 kA	95,71	1,64 kA					
AM_11 (3)					5,41 MVA	0,52 kA	95,71	1,30 kA					
AM_2 (3)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_3 (3)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_4 (3)					15,78 MVA	1,52 kA	95,71	3,80 kA					
AM_5 (3)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_6 (3)					10,74 MVA	1,03 kA	95,71	2,58 kA					
AM_7 (3)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_8 (3)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
AM_9 (3)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
6 кВ (3 секц)													
ВВ	6,00	0,00	0,00	1,10	364,37 MVA	35,06 kA	-84,90	87,64 kA	21,53	223,76	18,42	28,90	
СВ7	T7.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
СВ8	T8.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ТБП 2	24 кВ	6 кВ (3сек			177,40 MVA	17,07 kA	94,47	42,67 kA					
AM (3)					38,67 MVA	3,72 kA	95,71	9,30 kA					
AM_10 (4)					6,84 MVA	0,66 kA	95,71	1,64 kA					
AM_11 (4)					5,41 MVA	0,52 kA	95,71	1,30 kA					
AM_2 (4)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_3 (4)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_4 (4)					15,78 MVA	1,52 kA	95,71	3,80 kA					
AM_5 (4)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_6 (4)					10,74 MVA	1,03 kA	95,71	2,58 kA					
AM_7 (4)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_8 (4)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
AM_9 (4)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
ПРТЕП 1													
ВВ	6,00	0,00	0,00	1,10	212,23 MVA	20,42 kA	-86,66	53,02 kA	20,42	212,23	17,98	20,98	
СВ2	T1.3				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ПРТЕП	220 кВ	ПРТЕП 2			212,23 MVA	20,42 kA	93,34	53,02 kA					
ПРТЕП 2													
ВВ	6,00	0,00	0,00	1,10	212,23 MVA	20,42 kA	-86,66	53,02 kA	20,42	212,23	17,98	20,98	
СВ2	T1.3				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ПРТЕП	220 кВ	ПРТЕП 1			212,23 MVA	20,42 kA	93,34	53,02 kA					
СВ0	T0				263,26 MVA	3,95 kA	91,18	10,74 kA					
AT2	Терминал	220 кВ			263,26 MVA	3,95 kA	91,18	10,74 kA					
ВВ1	38,50	0,00	0,00	1,10	526,52 MVA	7,90 kA	-88,82	21,48 kA	7,90	526,52	6,95	8,38	
СВ0	T1				263,26 MVA	3,95 kA	91,18	10,74 kA					
AT1	Терминал	220 кВ			263,26 MVA	3,95 kA	91,18	10,74 kA					
6 кВ (1 секц)													
1секц	6,00	0,00	0,00	1,10	364,37 MVA	35,06 kA	-84,90	87,64 kA	21,53	223,76	18,42	28,90	
СВ13	T13.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ТБП 1	24 кВ	6 кВ (2 се			177,40 MVA	17,07 kA	94,47	42,67 kA					
AM (1 секц)					38,67 MVA	3,72 kA	95,71	9,30 kA					
AM_10 (1 секц)					6,84 MVA	0,66 kA	95,71	1,64 kA					
AM_11 (1 секц)					5,41 MVA	0,52 kA	95,71	1,30 kA					
AM_2 (1 секц)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_3 (1 секц)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_4 (1 секц)					15,78 MVA	1,52 kA	95,71	3,80 kA					
AM_5 (1 секц)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_6 (1 секц)					10,74 MVA	1,03 kA	95,71	2,58 kA					
AM_7 (1 секц)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_8 (1 секц)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
AM_9 (1 секц)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
6 кВ (2 секц)													
ВВ	6,00	0,00	0,00	1,10	364,37 MVA	35,06 kA	-84,90	87,64 kA	21,53	223,76	18,42	28,90	
СВ7	T7.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ТБП 1	24 кВ	6 кВ (1 се			177,40 MVA	17,07 kA	94,47	42,67 kA					
AM (2 секц)					38,67 MVA	3,72 kA	95,71	9,30 kA					
AM_10 (2секц)					6,84 MVA	0,66 kA	95,71	1,64 kA					
AM_11 (2 секц)					5,41 MVA	0,52 kA	95,71	1,30 kA					
AM_2 (2 секц)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_3 (2секц)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_4 (2 секц)					15,78 MVA	1,52 kA	95,71	3,80 kA					
AM_5 (2 секц)					31,09 MVA	2,99 kA	95,71	7,48 kA					
AM_6 (2 секц)					10,74 MVA	1,03 kA	95,71	2,58 kA					
AM_7 (2 секц)					20,99 MVA	2,02 kA	95,71	5,05 kA					
AM_8 (2 секц)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
AM_9 (2 секц)					2,69 MVA	0,26 kA	95,71	0,65 kA					
6 кВ (3секц)													
ВВ	6,00	0,00	0,00	1,10	364,37 MVA	35,06 kA	-84,90	87,64 kA	21,53	223,76	18,42	28,90	
СВ13	T13.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
СВ14	T14.1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ТБП 2	24 кВ	6 кВ (4 се			177,40 MVA	17,07 kA	94,47	42,67 kA					
AM (1 секц)					38,67 MVA	3,72 kA	95,71	9,30 kA					

Отримані дані дозволяють виконувати аналіз рівнів струмів КЗ.

Таблица 3.8 – Результати розрахунку режиму (струми однофазного КЗ)

Расчет КЗ		/ Метод : VDE 0102				1-фазное КЗ на земле				/ Макс. токи КЗ		
Асинхронные двигатели Всегда учитывать		Идентификация сети Автоматически				Длительность короткого замыкания Время откл. Время КЗ (Ith) Кэф. напряжения с Предопределен пользователем				0,25 с 1,00 с Нет		
Сеть: Сеть		Стадия сист.: Сеть				Прим.:				/ 1		
		Ком.У. [kV]	Напр. [kV]	с- Кэф.		Sk* [MVA/MBA]	Ik* [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
220 кВ												
1СШ	А	220,00	0,00	0,00	1,10	475,35 MVA	3,74 kA	-88,82	10,01 kA	3,74	475,35	0,00
	Б		125,49	-103,98		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,90
	С		124,30	104,16		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,89
СВО	T1					435,66 MVA	3,43 kA	91,18	5,17 kA			
	Б					39,65 MVA	0,31 kA	-88,82	0,84 kA			
	С					39,65 MVA	0,31 kA	-88,82	0,84 kA			
АТ1	Терминал	38.5 кВ				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
ПРГЭП	ПРГЭП 1	ПРГЭП 2				39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
	Б					39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
	С					39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
200 кВ												
2СШ	А	220,00	0,00	0,00	1,10	475,35 MVA	3,74 kA	-88,82	10,01 kA	3,74	475,35	0,00
	Б		125,49	-103,98		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,90
	С		124,30	104,16		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,89
СВО	T0					39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
	Б					39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
	С					39,65 MVA	0,31 kA	91,18	0,84 kA			
АТ2	Терминал	38.5 кВ				435,66 MVA	3,43 kA	91,18	5,17 kA			
	Б					39,65 MVA	0,31 kA	-88,82	0,84 kA			
	С					39,65 MVA	0,31 kA	-88,82	0,84 kA			
24 кВ												
БЗ	А	24,00	0,00	0,00	1,10	1485,20 MVA	107,19 kA	-89,25	279,49 kA	107,19	1485,20	0,00
	Б		13,82	-105,92		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,90
	С		13,74	106,12		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,90
Т	330 кВ					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
ТВП 1	6 кВ (1 сек	6 кВ (2 сек				93,50 MVA	6,75 kA	54,56	17,60 kA			
	Б					2,90 MVA	0,21 kA	3,10	0,55 kA			
	С					3,33 MVA	0,24 kA	5,44	0,63 kA			
ПВБ 2	6 кВ (3сек	6 кВ (4 сек				93,50 MVA	6,75 kA	54,56	17,60 kA			
	Б					2,90 MVA	0,21 kA	3,10	0,55 kA			
	С					3,33 MVA	0,24 kA	5,44	0,63 kA			
G1	А					1298,67 MVA	93,72 kA	-89,80	244,39 kA			
	Б					5,80 MVA	0,42 kA	3,10	1,09 kA			
	С					6,67 MVA	0,48 kA	5,44	1,26 kA			
330 кВ												
1СШ	А	330,00	0,00	0,00	1,10	1050,08 MVA	5,51 kA	-89,22	14,64 kA	5,51	1050,08	0,00
	Б		184,82	-99,34		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	С		184,05	99,45		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
СВО	T1					35,02 MVA	0,18 kA	90,78	0,49 kA			
	Б					35,02 MVA	0,18 kA	90,78	0,49 kA			
	С					35,02 MVA	0,18 kA	90,78	0,49 kA			
Т	24 кВ					1015,06 MVA	5,33 kA	90,78	14,15 kA			
	Б					35,02 MVA	0,18 kA	-89,22	0,49 kA			
	С					35,02 MVA	0,18 kA	-89,22	0,49 kA			
Куп'янська (2 АС	А					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
200 кВ												
2СШ	А	330,00	0,00	0,00	1,10	1050,08 MVA	5,51 kA	-89,22	14,64 kA	5,51	1050,08	0,00
	Б		184,82	-99,34		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	С		184,05	99,45		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
СВО	T0					1015,06 MVA	5,33 kA	90,78	14,15 kA			
	Б					35,02 MVA	0,18 kA	-89,22	0,49 kA			
	С					35,02 MVA	0,18 kA	-89,22	0,49 kA			
АТ1	220 кВ	38.5 кВ				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
АТ2	220 кВ	38.5 кВ				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
Донбаська (2 АС	А					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
Змиївська ТЕС (	А					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
Майорська (2 АС	А					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
38.5 кВ												
БЗ2	А	38,50	0,00	0,00	1,10	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	Б		42,35	-150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	С		42,35	150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
СВО	T0					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
АТ2	Терминал	220 кВ				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	Б					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	С					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			

Продовження табл. 3.8 – Результати розрахунку режиму (струми однофазного КЗ)

BB1	A	38,50	0,00	0,00	1,10		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		42,35	-150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		42,35	150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
СВ0	T1					A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AT1	Терминал	220 кВ				A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
6 кВ (1 сек)													
1сек	A	6,00	0,00	0,00	1,10		0,00 MVA	0,00 kA	-44,91	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		6,60	-150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		6,60	150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
СВ13	T13.1					A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
ТБП 1	24 кВ	6 кВ (2 се				A	0,00 MVA	0,00 kA	134,54	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	-45,72	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	-45,75	0,00 kA			
AM (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_10 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_11 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_2 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA			
AM_3 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_4 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_5 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_6 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_7 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA			
AM_8 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_9 (1 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
6 кВ (2 сек)													
БЗ	A	6,00	0,00	0,00	1,10		0,00 MVA	0,00 kA	-44,91	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		6,60	-150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		6,60	150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
СВ7	T7.1					A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
ТБП 1	24 кВ	6 кВ (1 се				A	0,00 MVA	0,00 kA	134,54	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	-45,72	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	-45,75	0,00 kA			
AM (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_10 (2сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_11 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_2 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA			
AM_3 (2сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_4 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_5 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA			
AM_6 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_7 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA			
AM_8 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
AM_9 (2 сек)						A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
6 кВ (3сек)													
БЗ	A	6,00	0,00	0,00	1,10		0,00 MVA	0,00 kA	-44,91	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		6,60	-150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		6,60	150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73

Продовження табл. 3.8 – Результати розрахунку режиму (струми однофазного КЗ)

Эксплуатационные данные											
СБ13	Т13.1						А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
СБ14	Т14.1						А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
ТТБ 2	24 кБ		6 кБ (4 се				А	0,00 MVA	0,00 kA	134,54	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	-45,72	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	-45,75	0,00 kA
АМ (1 секун(1)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_10 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_11 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_2 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA
АМ_3 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_4 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_5 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_6 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_7 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA
АМ_8 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_9 (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
6 кБ (4 секун)							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
БЗ	А	6,00	0,00	0,00	1,10		Б	0,00 MVA	0,00 kA	-44,91	0,00 kA
	Б		6,60	-150,00			С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
	С		6,60	150,00			А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
СБ7	Т7.1						Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
СБ8	Т8.1						А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
ТТБ 2	24 кБ		6 кБ (3сек				А	0,00 MVA	0,00 kA	134,54	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	-45,72	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	-45,75	0,00 kA
АМ (3)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_10 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_11 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_2 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA
АМ_3 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_4 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_5 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,37	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,16	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,13	0,00 kA
АМ_6 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_7 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	135,34	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	134,41	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	134,39	0,00 kA
АМ_8 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
АМ_9 (4)							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
ПРТБН 1							А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
БЗ	А	6,00	0,00	0,00	1,10		Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
	Б		6,60	-150,00			С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
	С		6,60	150,00			А	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
СБ2	Т1.3						Б	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA
							С	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA

Продовження табл. 3.8 – Результати розрахунку режиму (струми однофазного КЗ)

						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ПРТЕП						220 кВ	ПРТЕП 2	A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
								B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
								C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
ПРТЕП 2															
БЗ	A	6,00	0,00	0,00	1,10		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B		6,60	-150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00	1,73	
	C		6,60	150,00			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00	1,73	
СВЗ	Т1.3					A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
						B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
						C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA					
ПРТЕП						220 кВ	ПРТЕП 1	A	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
								B	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
								C	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			

Роздивимося вплив навантаження на хід перехідних процесів:

по-перше, більше навантаження – більший рівень збудження в порівнянні з режимом холостого ходу;

по-друге, воно впливає на розподіл струмів в схемі електропостачання;

крім того, навантаження зменшує зовнішній опір в колі статора генератора (шунтує).

Внаслідок останнього фактору, збільшується струм в колі статора, зменшується напруга на виводах, і відповідно зменшується струм на ділянці, де виникло ушкодження.

Теоретично доведено, що при віддаленості КЗ вплив навантаження збільшується, і навпаки, при КЗ на виводах, навантаження не здійснює значного впливу.

Промислове навантаження, звісно ж, складається переважно з двигунів, опір яких істотно залежить від ковзання (див. розділ 3.1). Незважаючи на це, допустимим є характеризувати навантаження постійною індуктивністю, яка приводиться до повної потужності навантаження і середньої номінальної напруги точки підключення навантаження: $x_{нав} = 1,2$, $E_{нав} = 0$.

Для кожного генератора можна встановити найменшу величину зовнішньої реактивності (критична реактивність), при КЗ за якою генератор при граничному збудженні забезпечує нормальну (номінальну) напругу на затискачах:

$$x_{кр} = x_d \cdot \frac{U_{ном}}{E_{г.м.ст.к} - U_{ном}}$$

Для режиму нормальної напруги:

$$\left. \begin{aligned} x_{зовн} &\geq x_{кр} \\ I_f &\leq I_{f, макс} \\ U &= U_{ном} \\ I_{кз} &= \frac{U_{ном}}{x_{зовн}} \leq I_{кр} \end{aligned} \right\}$$

Для режиму граничного збудження:

$$\left. \begin{aligned} x_{зовн} &\leq x_{кр} \\ I_f &= I_{f, макс} \\ U &\leq U_{ном} \\ I_{кз} &= \frac{E_{q, макс}}{x_d + x_{зовн}} \geq I_{кр} \end{aligned} \right\}$$

Отже усталений режим КЗ для генератора розраховується в наступній послідовності:

- визначається індуктивний опір зовнішнього кола $x_{зовн}$;
- визначається критична реактивність $x_{кр}$;
- визначається співвідношення між $x_{зовн}$ і $x_{кр}$;
- робиться висновок про режим роботи генератора с регулятором збудження;
- визначається струм в колі генератора $I_{кз}$;
- визначається розподіл струмів в інших колах мережі.

Висновки за третім розділом

У даному розділі досліджувалася електрична частина електричної станції. В роботі була приведена схема підключення електричної станції до

електричної системи з розподілом приєднань по шинам розподільчих устроїв, електрична схема електростанції зі схемою власних потреб. Для даної схеми приводяться параметри генератора, силових трансформаторів, асинхронних двигунів.

У цьому розділі виконаний розрахунок параметрів схем заміщення асинхронних двигунів власних потреб. Були визначені експлуатаційні параметри двигунів (параметри схем заміщення); пускові характеристики (залежності струму і моменту обертання від ковзання).

Також в роботі розраховуються кутова швидкість $\omega = f(t)$ і напруга самозапуску двигунів власних потреб електростанції $U_{c.з.} = f(t)$.

У даному розділі створена математична модель електричної частини електростанції, показаний результат розрахунку сталого режиму максимального навантаження. За допомогою цієї ж моделі виконаний розрахунок сталій короткого замикання як трифазного, так і однофазного.

Отримані практичні результати магістерської роботи будуть використанні на кафедрі «Електрична інженерії» ДВНЗ ДонНТУ для лабораторних і практичних робіт при вивченні дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій».

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Умови праці – сукупність усіх чинників, які необхідні для нормальної життєдіяльності працівників під час роботи. Вони характеризуються:

– загальними показниками: конструктивні особливості виробничого устаткування; особливості систем енергопостачання; зовнішні кліматичні умови та особливості розташування виробничого устаткування; наявність пристроїв для створення мікроклімату, освітлення, опалення тощо;

– локальними показниками: рівень статичних і динамічних навантажень працівників; рівень напруженості праці; кількісні показники небезпечних і (або) шкідливих виробничих чинників (НШВЧ); санітарно гігієнічні умовами у виробничих приміщеннях та на робочих місцях тощо.

За своїм походженням та природою дії НШВЧ поділяють на п'ять груп: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні та соціальні.

До фізичних НШВЧ відносяться машини та механізми або їх елементи, а також вироби, матеріали, заготовки тощо, які рухаються або обертаються; конструкції, які руйнуються; системи, устаткування або елементи обладнання, які знаходяться під підвищеним тиском; підвищена запиленість та загазованість повітря; підвищена або понижена температура повітря, поверхонь приміщення, обладнання, матеріалів; підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвуку, інфразвуку; підвищений або понижений барометричний тиск та його різкі коливання; підвищена та понижена вологість; підвищена швидкість руху та підвищена іонізація повітря; підвищений рівень іонізуючих випромінювань; підвищене значення напруги в електричній мережі; підвищені рівні статичної електрики, електромагнітних випромінювань; підвищена напруженість електричного, магнітного полів; відсутність або нестача світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; понижена контрастність; прямий та віддзеркалений блиск; підвищена пульсація світлового потоку; підвищені рівні ультрафіолетової та інфрачервоної радіації; гострі кромки, задирки,

шершавість на поверхні заготовок, інструментів та обладнання; розташування робочого місця на значній висоті відносно землі (підлоги); слизька підлога; невагомість.

До хімічних НШВЧ відносяться хімічні речовини, які по характеру дії на організм людини поділяються на токсичні, задушливі, наркотичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію. Основні способи потрапляння НШВЧ в організм – інгаляційний (органи дихання), пероральний (шлунково-кишковий тракт) і резорбційний (шкіряні покриви та слизисті оболонки).

До біологічних НШВЧ відносяться патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, рикетсії, спірохети, грибки, найпростіші) та продукти їхньої життєдіяльності, а також макроорганізми (тварини та рослини).

До психофізіологічних НШВЧ відносяться фізичні (статичні та динамічні) перевантаження і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Соціальні НШВЧ – це неякісна організація роботи, понаднормова робота, необхідність роботи в колективі з поганими відносинами між його членами, соціальна ізоляваність з відривом від сім'ї, зміна біоритмів, незадоволеність роботою, фізична та/або словесна образа та її ризик, насильство та його ризик.

На енергетичних об'єктах фіксують усі види НШВЧ. Основними НШВЧ під час експлуатації електроустановок є електричний струм, напруга прямого і непрямого дотику, напруга кроку, електростатичні та електромагнітні поля промислової частоти, електрична дуга, яка утворюється під час комутації енергетичного устаткування.

Особливості електротравматизму.

Електротравматизм порівняно з травматизмом від інших небезпечних чинників притаманні такі особливості:

По-перше, несподіваність отримання електротравми – пов'язана з тим, що людина не має датчиків (рецепторів), за допомогою яких вона могла би дистанційно визначити наявність небезпеки (електричної напруги) на елементах обладнання (як, наприклад, інші небезпечні фактори – частини обладнання, що рухаються, нагріті деталі та інші). Не знаючи про небезпеку, людина сміливо доторкується до частини обладнання під напругою. Захисна реакція у цьому випадку виникає лише після включення людини під напругу, тобто після того, як через неї починає протікати електричний струм. Наслідки такого включення визначаються співвідношенням двох швидкостей: швидкості гальмівної дії електричного струму і швидкості захисної реакції організму. Якщо більше швидкість захисної реакції, людина самостійно відключається з ЕУ, а якщо більшою є швидкість гальмівної дії електричного струму, людина на певний час залишається включеною в електричне коло.

По-друге, можливість дистанційного отримання електротравм без безпосереднього контакту з установкою під напругою – це може бути ураження через електричну дугу, якщо людина наблизилася на критичну відстань до ЕУ напругою понад 1 кВ, або ураження напругою кроку, якщо людина знаходиться у зоні локальної землі у випадку замикання на землю.

Далі, можлива рефлекторність дії електричного струму – електричний струм, що протікає через тіло людини під час ураження, діє не тільки у місцях контактів (точка входу і точка виходу), але ще спричиняє й рефлекторну дію, порушуючи роботу центрів, які координують роботу життєво важливих органів, найчастіше серцево-судинної системи та дихання.

Наступне, невідомість, прихованість більшості електротравм – розслідуванню, обліку та аналізу доступні лише електротравми з тяжкими та смертельними наслідками, а усі інші випадки включення людини в електричне коло залишаються невідомими, хоча причини цих електротравм, як правило, однакові; такий стан негативно впливає на профілактику електротравм.

ВИСНОВКИ

В даній роботі була створення математичної моделі електричної частини електростанції з метою дослідження сталих та перехідних режимів роботи мережі. Отриману математичну модель можна використовувати для підвищення надійності функціонування такого важливого елементу енергосистеми, як електрична станція.

Крім того проаналізовані математичні моделі двигунів власних потреб, визначенні параметри їх схем заміщення, отримані пускові характеристики. За допомогою отриманих даних є можливість аналізувати процеси самозапуску двигунів власних потреб вище згаданих електричних станцій.

У першому розділі розглянуті причини та наслідки виникнення коротких замикань.

У другому розділі розглядаються фізичні явища, які виникають в ЕЕС системах при виникненні перехідних процесів.

Особливу увагу приділено питанням перехідних процесів синхронних машин без демпферних обмоток або з ними. Розглянуті диференційні рівняння, які у повній мірі описують перехідні процеси. Вони враховують основні складові електромагнітного перехідного процесу в електричній машині, і ці рівняння визначають струм раптового трифазного КЗ.

На векторних діаграмах проаналізовані складові струмів КЗ, їх залежність від попереднього режиму і характеру навантаження.

У третьому розділі досліджувалася електрична частина електричної станції. В роботі була приведена схема підключення електричної станції до електричної системи з розподілом приєднань по шинам розподільчих пристроїв, електрична схема електростанції зі схемою власних потреб. Для даної схеми приводяться параметри генератора, силових трансформаторів, асинхронних двигунів.

Виконаний розрахунок параметрів схем заміщення асинхронних двигунів власних потреб. Були визначені експлуатаційні параметри двигунів

(параметри схем заміщення); пускові характеристики (залежності струму і моменту обертання від ковзання). Також в роботі розраховуються кутова швидкість $\omega = f(t)$ і напруга самозапуску двигунів власних потреб електростанції $U_{c.з.} = f(t)$.

Створена математична модель електричної частини електростанції, показаний результат розрахунку сталого режиму максимального навантаження. За допомогою цієї ж моделі виконаний розрахунок сталий короткого замикання як трифазного, так і однофазного.

Отримані практичні результати магістерської роботи будуть використанні на кафедрі «Електрична інженерії» ДВНЗ ДонНТУ для лабораторних і практичних робіт при вивченні дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій».

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Григорьева В. А. Тепловые и атомные электрические станции / В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с.
2. Мотыгина С. А. Эксплуатация электрической части тепловых электростанций / С. А. Мотыгина. – М.: Энергия, 1979. – 568 с.
3. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных ЭД / И. А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1974. – 94 с.
4. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Москва, 1950. – 551 с.
5. Переходные процессы в системах электроснабжения / [В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен та ін.]. – Киев: "Виша школа", 1989. – 422 с.
6. Husson R. Control Methods for Electrical Machines / René Husson. – New York: Wiley & Sons, 2009. – 384 с.
7. Arrillaga J. Computer Modelling of Electrical Power Systems / J. Arrillaga, N. R. Watson., 2001. – 369 с.
8. Cobus S. Practical Electrical Network Automation and Communication Systems / Strauss Cobus., 2003. – 200 с.
9. Křížek M. Mathematical and Numerical Modelling in Electrical Engineering Theory and Applications / M. Křížek, P. Neittaanmäki. – Dordrecht: Springer, 1996. – 276 с.
10. Kłos A. Mathematical Models of Electrical Network Systems / Andrzej Kłos. – Cham: Springer, 2017. – 105 с.
11. Gertsbakh I. Network Reliability / I. Gertsbakh, Y. Shpungin. – Singapore: Springer, 2020. – 90 с.
12. Eric Wong W. Computer Engineering and Networking / W. Eric Wong, T. Zhu. – Cham: Springer, 2014. – 1426 с.
13. Mehmet E. Analysis of Deterministic Cyclic Gene Regulatory Network Models with Delays / E. Mehmet, Ö. Hitay, N. Silviu-Iulian. – Cham: Birkhäuser, 2015. – 94 с.