

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Моделювання електромеханічних систем»
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(освітня програма «Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання.
Частина 2

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання . Частина 2 / Укл.: Т. П. Солодовнікова, С.О. Лапкіна, І.Д. Галушко. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023– 31 с.

Укладачі: Т. П. Солодовнікова, старш. викл,
С.О. Лапкіна, асист.,
І. Д. Галушко, зав. лаб.

Рецензент Д. С. Яримбаш, проф., доктор техн. наук.

Відповідальний за випуск С.О. Лапкіна, асист.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол №1
від 14.08.23 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол №1
від 21.09.2023 р.

ЗМІСТ

Загальні методичні вказівки	4
1 Лабораторна робота №1 «Дослідження синхронного генератора в режимі раптового трифазного короткого замикання»	5
1.1 Теоретичні відомості	5
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	8
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки	8
1.4 Програма роботи	9
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи	9
1.6 Зміст звіту	10
2 Лабораторна робота №2 «Дослідження синхронного генератора в режимі гасіння поля»	11
2.1 Теоретичні відомості	11
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	13
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки	13
2.4 Програма роботи	13
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи	14
2.6 Зміст звіту	14
3 Лабораторна робота №3 «Форсування збудження та гасіння поля при розімкненій обмотці статора синхронного генератора»	16
3.1 Теоретичні відомості	18
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	18
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки	19
3.4 Програма роботи	19
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи	20
3.6 Зміст звіту	21
4 Лабораторна робота № 4 «Пуск двигуна постійного струму»	21
4.1 Теоретичні відомості	25
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	25
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки	25
4.4 Програма роботи	26
4.5 Порядок виконання лабораторної роботи	29
4.6 Зміст звіту	30
Перелік джерел посилання	30

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Теоретичні відомості

Робота електромеханічних систем (ЕМС) у реальних умовах експлуатації сполучена з необхідністю виконання ряду вимог, обумовлених областю застосування даного класу технічних систем і розв'язуваних технологічних завдань:

- підтримки одного або декількох вихідних показників на заданих рівнях при зовнішніх впливах, що змінюються;
- зміни цих або інших показників за заданими алгоритмами залежно від часу або від інших показників;
- досягнення в процесі роботи екстремальних значень тих показників, які в цьому випадку визначають якість функціонування ЕМС;
- адаптації системи до зовнішніх впливів, що змінюються.

Даний перелік не розкриває всього різноманіття функціональних завдань і наведений тут тільки для формування в студентів ясного розуміння необхідності вивчення дисципліни.

Довгота перехідних процесів достатньо мала, але вони супроводжуються великими кидками струмів й електромагнітного моменту. Це значно ускладнює експериментальні дослідження перехідних процесів, тому є доцільним вивчення методів математичного моделювання, розробки універсальних математичних моделей, використання програм та методів, які дозволяють аналізувати перехідні процеси.

Початкові дані

При виконанні лабораторних робіт студент одержує індивідуальний варіант завдання – шестизначне число, яке є комбінацією цифр 1 чи 2. Початкові дані визначаються за таблицями відповідно варіанту. В кожній лабораторній роботі зроблені конкретні вказівки що до вибору початкових даних в залежності від типу перехідного процесу або типу машини.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМІ РАПТОВОГО ТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Мета роботи: моделювання рівнянь синхронної машини на ЕОМ

1.1 Теоретичні відомості

Електромагнітні процеси, які протікають при раптовому короткому замиканні, з урахуванням загальноприйнятих у теорії синхронних машин припущень та без урахування зміни частоти обертання ротора, описуються в системі координат d і q , жорстко зв'язаних з ротором системою диференційних рівнянь відносно потокозчеплень у в.о.

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \Psi_{sq} \\ 0 &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \Psi_{sd} \\ U_{3\bar{b}} &= R_{3\bar{b}} \cdot i_{3\bar{b}} + \frac{d\Psi_{3\bar{b}}}{dt} \\ 0 &= R_{\bar{d}d} \cdot i_{\bar{d}d} + \frac{d\Psi_{\bar{d}d}}{dt} \\ 0 &= R_{\bar{d}q} \cdot i_{\bar{d}q} + \frac{d\Psi_{\bar{d}q}}{dt} \end{aligned} \right\} \text{де } \left. \begin{aligned} \Psi_{sd} &= x_{sd} \cdot i_{sd} + x_d (i_{3\bar{b}} + i_{\bar{d}d}) \\ \Psi_{sq} &= x_{sq} \cdot i_{sq} + x_q \cdot i_{\bar{d}q} \\ \Psi_{3\bar{b}} &= x_{3\bar{b}} \cdot i_{3\bar{b}} + x_d (i_{sd} + i_{\bar{d}d}) \\ \Psi_{\bar{d}d} &= x_{\bar{d}d} \cdot i_{\bar{d}d} + x_d (i_{sd} + i_{3\bar{b}}) \\ \Psi_{\bar{d}q} &= x_{\bar{d}q} \cdot i_{\bar{d}q} + x_q \cdot i_{sq} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де x_{sd} , x_{sq} – індуктивні синхронні опори по поздовжній та поперечній осях (dq);

$x_{3\bar{b}}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки збудження;

$x_{\bar{d}d}$, $x_{\bar{d}q}$ – індуктивні опори розсіювання демпферної обмотки по осях dq;

x_{ad} , x_{aq} – індуктивні опори самоіндукції по осях dq;

R_s , $R_{3\bar{b}}$ – номінальні активні опори обмоток статора та збудження;

$R_{\bar{d}d}$, $R_{\bar{d}q}$ – активні опори демпферної обмотки по осях dq.

Системи рівнянь (1.1) відносно потокозчеплень перетворимо в

систему (1.2) з коефіцієнтами

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sd}}{dt} &= -A_1 \cdot R_s \cdot \Psi_{sd} + A_2 \cdot R_s \cdot \Psi_{3\bar{b}} + A_3 \cdot R_s \cdot \Psi_{\bar{d}d} + \Psi_{sq} \\ \frac{d\Psi_{sq}}{dt} &= -A_4 \cdot R_s \cdot \Psi_{sq} + A_5 \cdot R_s \cdot \Psi_{\bar{d}q} - \Psi_{sd} \\ \frac{d\Psi_{3\bar{b}}}{dt} &= U_{3\bar{b}} - A_6 \cdot R_{3\bar{b}} \cdot \Psi_{3\bar{b}} + A_2 \cdot R_{3\bar{b}} \cdot \Psi_{sd} + A_7 \cdot R_{3\bar{b}} \cdot \Psi_{\bar{d}d} \\ \frac{d\Psi_{\bar{d}d}}{dt} &= -A_8 \cdot R_{\bar{d}d} \cdot \Psi_{\bar{d}d} + A_3 \cdot R_{\bar{d}d} \cdot \Psi_{sd} + A_7 \cdot R_{\bar{d}d} \cdot \Psi_{3\bar{b}} \\ \frac{d\Psi_{\bar{d}q}}{dt} &= -A_9 \cdot R_{\bar{d}q} \cdot \Psi_{\bar{d}q} + A_5 \cdot R_{\bar{d}q} \cdot \Psi_{sq} \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

де

$$\begin{aligned} x_{sd} &= x_{\sigma s} + x_d, & x_{sq} &= x_{\sigma s} + x_q, \\ A_1 &= \frac{x_{3\bar{b}} \cdot x_{\bar{d}d} - x_d^2}{D_1}, & A_2 &= \frac{x_d \cdot x_{\bar{d}d} - x_d^2}{D_1}, & A_3 &= \frac{x_d \cdot x_{3\bar{b}} - x_d^2}{D_1}, \\ A_4 &= \frac{x_{\bar{d}q}}{D_2}, & A_5 &= \frac{x_q}{D_2}, & A_6 &= \frac{x_{sd} \cdot x_{\bar{d}d} - x_d^2}{D_1}, \\ A_7 &= \frac{x_d \cdot x_{sd} - x_d^2}{D_1}, & A_8 &= \frac{x_{sd} \cdot x_{3\bar{b}} - x_d^2}{D_1}, & A_9 &= \frac{x_{sq}}{D_2}, \\ D_1 &= x_{sd} \cdot x_{3\bar{b}} \cdot x_{\bar{d}d} - 2x_d^3 - x_d^2 \cdot (x_{sd} + x_{3\bar{b}} + x_{\bar{d}d}), \\ D_2 &= x_{sq} \cdot x_{\bar{d}q} - x_q^2. \end{aligned}$$

Рішення системи (1.2) числовими методами дає можливість визначити струми обмоток

$$\left. \begin{aligned} i_{sd} &= A_1 \cdot \Psi_{sd} - A_2 \cdot \Psi_{3\bar{b}} - A_3 \cdot \Psi_{\bar{d}d} \\ i_{sq} &= A_4 \cdot \Psi_{sq} - A_5 \cdot \Psi_{\bar{d}q} \\ i_{3\bar{b}} &= A_6 \cdot \Psi_{3\bar{b}} - A_2 \cdot \Psi_{sd} - A_7 \cdot \Psi_{\bar{d}d} \\ i_{\bar{d}d} &= A_7 \cdot \Psi_{\bar{d}d} - A_3 \cdot \Psi_{sd} - A_7 \cdot \Psi_{3\bar{b}} \\ i_{\bar{d}q} &= A_9 \cdot \Psi_{\bar{d}q} - A_5 \cdot \Psi_{sq} \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

а також значення електромагнітного моменту

$$M_{em} = \Psi_{sd} \cdot i_{sq} - \Psi_{sq} \cdot i_{sd}. \quad (1.4)$$

Для визначення дійсних струмів в обмотках статора необхідно перетворити струми статора із системи координат dq в систему координат $\alpha\beta$

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_{sd} \cdot \cos(\omega t + \Theta_{\text{ноч}}) - i_{sq} \cdot \sin(\omega t + \Theta_{\text{ноч}}) \\ i_{s\beta} &= i_{sd} \cdot \sin(\omega t + \Theta_{\text{ноч}}) + i_{sq} \cdot \cos(\omega t + \Theta_{\text{ноч}}) \end{aligned} \right\}, \quad (1.5)$$

де $\Theta_{\text{ноч}}$ – початковий кут повороту ротора.

Значення струмів $i_{s\alpha}$ та $i_{s\beta}$ залежить від початкових значень потокозчеплень обмотки статора з основним потоком збудження.

Якщо припустити, що раптове коротке замикання відбулося в момент, коли вісь полюсів (тобто вісь обмотки збудження) збігається з віссю обмотки, розташованій по осі α , то потокозчеплення цієї обмотки з основним потоком збудження буде максимальним ($\Psi_o = \max$). У цьому випадку струм статора по осі α містить періодичну й аперіодичну складові. Тоді потокозчеплення обмотки, розташованої по осі β , з основним магнітним потоком буде дорівнювати нулю ($\Psi_o = 0$), отже струм обмотки по осі β буде містити тільки періодичну складову.

Якщо при перетворенні трифазної синхронної машини у двофазну, вісь фази А сполучити з віссю α , то $i_A = i_{s\alpha}$, що відповідає моменту часу раптового короткого замикання при $\Psi_o = \max$. Якщо ж вісь фази А сполучити з віссю β , то $i_A = i_{s\beta}$, що відповідає моменту часу раптового короткого замикання при $\Psi_o = 0$.

Побудова складових струму фази А. За результатами розрахунку будують обвідні до кривих струмів фази А. Побудова обвідних дозволяє відділити аперіодичну складову струму від періодичної. Напіврізниця ординат верхньої та нижньої обвідних у будь-який момент часу являється аперіодичною складовою струму в цей момент, а їхня напівсума амплітудою періодичної складової.

Наступним етапом опрацювання результатів є розділення періодичної складової струму раптового короткого замикання на складові:

- усталений струм короткого замикання,
- згасаючий струм перехідного режиму,
- згасаючий струм надперехідного режиму.

Усталений струм РКЗ визначається по кінцевій ділянці періодичної складової струму, тому що після згасання перехідного процесу його значення віднімається від усіх значень періодичної складової.

Решта від цього віднімання будується по вісі абсцис з рівномірною шкалою відкладається час, а по вісі ординат – решта числових величин. Початкова частина графіка струму представляє собою суму двох показників функцій з різними постійними часу. Після згасання струму в демпферній обмотці та відповідній йому надперехідній складовій струму якоря, обвідна переходить у похилу пряму. Продовження цієї прямої до осі ординат відсікає на цій вісі початкове значення складової перехідного струму, а різниця між проведеною прямою та кривою – значення складової надперехідного режиму. Для знаходження початкового значення складової надперехідного режиму – відкласти ці різниці на цьому ж самому напівлогарифмічному папері та лінійно екстраполювати їх на момент короткого замикання. При цьому, як правило, тільки перші 3 – 4 точки добре вкладаються на пряму, тому тільки вони приймаються до уваги при екстраполяції.

1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темами: «Дослідження синхронного генератора в режимі раптового трифазного короткого замикання». Ознайомитись з матеріалом п. 1.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1.3.1 Як визначити струм короткого замикання у фазах В та С синхронного генератора?

1.3.2 В якій з обмоток, збудження чи демпферній, буде швидше згасати періодична складова струму короткого замикання?

1.3.3 Як впливає значення початкового потокозчеплення на струм короткого замикання в синхронному генераторі?

1.3.4 Чому дорівнює сталий струм короткого замикання в демпферній обмотці?

1.4 Програма роботи

1.4.1 Аналіз математичної моделі синхронного генератора.

1.4.2 Розрахунок на ЕОМ струмів обмоток ротора, статора, електромагнітного моменту при раптовому короткому замиканні за наявністю та відсутністю демпферної обмотки.

1.4.3 Обробка результатів розрахунку.

1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Значення індуктивних опорів синхронного генератора у відносних одиницях обирають із таблиці 1.1 за варіантом.

Таблиця 1.1 – Індуктивні опори синхронного генератора (у в.о.)

Місце цифри за варіантом	Індуктивні опори					
	по поздовжній осі x_d	по поперечній осі x_q	розсіювання			
			обмотки статора x_s	обмотки збудження $x_{зб}$	демперної обмотки по поздовжній осі $x_{\delta d}$	демперної обмотки по поперечній осі $x_{\delta q}$
	1	2	3	4	5	6
Цифра 1	1.2	0.8	0.12	0.35	0.08	0.06
Цифра 2	1.3	0.9	0.15	0.40	0.10	0.07

Таблиця 1.2 – Початкові дані (у в.о.)

Індуктивні опори самоіндукції:	
по поздовжній осі d	$x_{ad} = 1.08$
по поперечній осі q	$x_{aq} = 0.64$
Номінальні активні опори:	
резистора гасіння поля	$R_{\delta} = 0.015$
обмотки збудження	$R_{зб} = 0.04$
демперної обмотки: по поздовжній осі d	$R_{\delta d} = 0.05$
по поперечній осі q	$R_{\delta q} = 0.03$

1.5.1 Проаналізувати математичну модель синхронного генератора (п. 1.1.) з розрахованими коефіцієнтами. Зробити висновки.

1.5.2 Провести розрахунок струмів обмоток ротора та статора, електромагнітного моменту при раптовому короткому замиканні (РКЗ) на ЕОМ за програмою **SIN 3**, враховуючі початкові умови.

Початкові умови для струмів в режимі раптового короткого замикання, яке відбулося із режиму неробочого ходу (тобто $E = U_H$):

- струми обмотки статора по осях dq $i_{sd} = i_{sq} = 0$ в.о.,
- струми демпферної обмотки по осях dq $i_{\partial d} = i_{\partial q} = 0$ в.о.,
- струм обмотки збудження $i_{3\phi} = E/x_d = 1/x_d$, в.о.

На обмотку збудження подається напруга, в.о.

$$U_{3\phi} = R_{3\phi} \cdot i_{3\phi} = \frac{R_{3\phi}}{x_d}.$$

Розрахунок режиму РКЗ провести при значеннях початкового кута: $\Theta_H = 0$ та $\Theta_H = \pi/2$, а також при наявності та відсутності демпферної обмотки.

За результатами розрахунків побудувати характеристики струмів та електромагнітного моменту в функції часу. Визначити дійсні струми в обмотках статора (1.5) та побудувати їх залежності в функції часу.

1.5.3. За результатами розрахунку (п. 1.5.2) побудувати обвідні до кривих струмів фази А (див. п. 1.1).

Розділити періодичні складові струмів раптового короткого замикання на складові: усталений струм короткого замикання, згасаючий струм перехідного режиму та згасаючий струм надперехідного режиму.

1.6 Зміст звіту

1.6.1 Аналіз математичної моделі (1.2) - (1.3).

1.6.2 Розрахунок режиму РКЗ, графіки струмів та електромагнітного моменту синхронного генератора в функції часу.

1.6.3 Графіки обвідних до кривих струмів фази А.

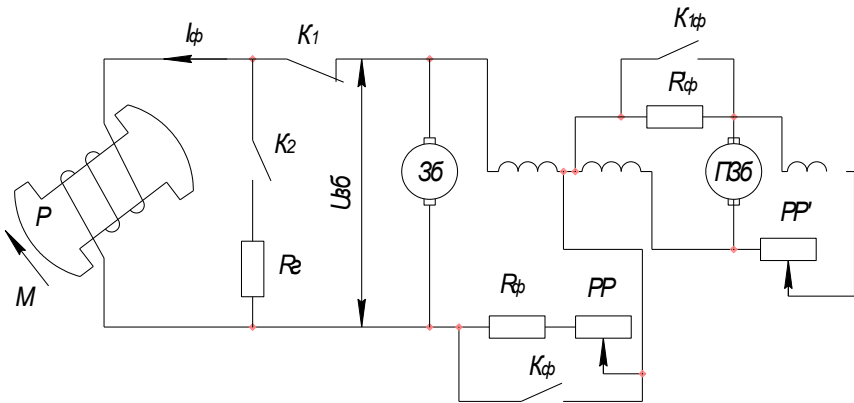
1.6.4 Висновки.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМІ ГАСІННЯ ПОЛЯ

Мета роботи: проведення аналізу результатів розрахунку режиму гасіння поля після раптового трифазного короткого замикання

2.1 Теоретичні відомості

Струм збудження у великих синхронних машинах становить кілька сотень і навіть тисяч амперів. Тому економічно недоцільно регулювати його за допомогою реостата, ввімкненого в контур ланцюга обмотки збудження – якоря збудника. Втрати в реостаті помітно знижували б ККД. Керування струмом збудження здійснюється винятково за рахунок зміни напруги збудника, пропорційно якій змінюється струм.



P – ротор машини; $3Б$ – збудник (ГПС із паралельним незалежним збудженням); $ПЗБ$ – підзбудник (ГПС із незалежним збудженням); PP, PP' – регульовальні резистори; $Kф, K1ф$ – контактори для форсування збудження; $Rф, Rф'$ – резистори, які закорочують при форсуванні; $K1, K2$ – контакти автомата гасіння поля (АГП); $Rг$ – резистор гасіння

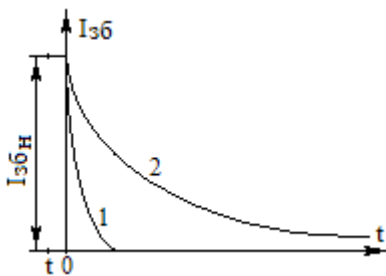
Рисунок 2.1 – Схема електромашинної системи збудження великої синхронної машини

Гасіння поля збудження. У схемі збудження передбачається спеціальний пристрій, за допомогою якого можна в аварійній ситуації з достатньою швидкістю зменшити струм збудження до нуля («погасити» магнітне поле). «Гасіння» поля здійснюється як при нормальній експлуатації, так і в аварійній ситуації (наприклад, при внутрішніх коротких замиканнях в обмотці ротора) за допомогою автомата гасіння поля (АГП), що поєднує контактори К1 та К2 опору гасіння Rг.

Прямий розрив ланцюга контактором К1 набагато швидше призвів би до бажаного результату (крива 1, рис. 2.2). Однак в опорі електричної дуги контактів К1 за час гасіння виділилася б вся енергія, яка запасена в магнітному полі збудження, що у великих машинах спричинило б руйнування контактів. Крім того, при настільки швидкому зменшенні струму збудження (за рахунок великого опору дуги) в обмотці з'являється значна ЕРС самоіндукції

$$e_c = -L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt},$$

що у багато разів перевищує номінальну напругу на обмотці збудження й може ушкодити її ізоляцію.



1 – пряме вимикання;
2 – гасіння поля за допомогою АГП

Рисунок 2.2 – Затухання струму збудження при гасінні поля

Для виключення цих явищ «гасіння» поля проводиться за допомогою АГП. При ввімкненому контакторі К1 вмикається контактор К2, який замикає обмотку на опір гасіння. Потім розмикається контактор К1. Енергія магнітного поля збудження при цьому не змінюється, тому К1 розмикається без ускладнень.

Струм збудження затухає відповідно до рівняння (крива 2, рис. 2.2)

$$I_{зб} = I_{збН} \cdot e^{-t/T_{зб\sigma}}$$

з постійною часу

$$T_{3\bar{\delta}_2} = \frac{L_{3\bar{\delta}}}{R_2 + R_{3\bar{\delta}}} = \frac{R_{3\bar{\delta}}}{R_2 + R_{3\bar{\delta}}} T_{3\bar{\delta}},$$

де $T_{3\bar{\delta}}$ – постійна часу обмотки збудження при розімкнутих інших обмотках, $T_{3\bar{\delta}} = L_{3\bar{\delta}} / R_{3\bar{\delta}}$.

При звичайно рекомендованому опорі гасіння $R_2 = 5R_{3\bar{\delta}}$ постійна часу гасіння поля (у великих машинах) $T_{3\bar{\delta}_2} = (1/6)T_{3\bar{\delta}} \approx 1c$, напруга на опорі гасіння не перевершує п'ятикратної номінальної напруги збудження.

2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Дослідження синхронного генератора в режимі гасіння поля після раптового трифазного короткого замикання». Ознайомитись з матеріалом п. 2.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

2.3.1 Яким чином в аварійній ситуації з достатньою швидкістю можна зменшити струм збудження до нуля?

2.3.2 Чому недоцільно регулювати струм збудження за допомогою реостата, ввімкненого в контур ланцюга обмотки збудження?

2.3.3 Небажані явища, які виникають при прямому розриві ланцюга обмотки збудження?

2.3.4 Переваги використання АГП.

2.4 Програма роботи

2.4.1 Аналіз математичної моделі синхронного генератора.

2.4.2 Дослідження гасіння струму після раптового короткого трифазного замикання.

2.4.3 Обробка результатів розрахунку.

2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Значення індуктивних опорів синхронного генератора та загальні початкові дані у відносних одиницях обирають із таблиць 1.1, 1.2.

2.5.1 Провести аналіз математичної моделі (1.1) синхронного генератора з новими початковими умовами.

За початкові значення струмів всіх обмоток приймаються струми цих обмоток у режимі трифазного короткого замикання, які обираються з лабораторної роботи № 1 через деякий час після початку РКЗ (за завданням викладача). Напряга обмотки збудження дорівнює нулю $U_{зб} = 0$.

2.5.2 Розрахувати режим гасіння поля після РКЗ використовуючи математичну модель (1.1) з новими початковими умовами (п. 2.5.1).

Розрахувати три режими гасіння поля:

- обмотка збудження розімкнена $R_{зб1} = 100 \cdot R_{зб}$;
- обмотка збудження короткозамкнена $R_{зб2} = R_{зб}$;
- обмотку збудження замкнено на опір резистора гасіння поля $R_{зб3} = R_{зб} + R_{\delta}$.

За результатами розрахунків побудувати характеристики струмів та електромагнітного моменту в функції часу. Визначити дійсні струми в обмотках статора (1.5) та побудувати їх залежності в функції часу.

2.5.3. Вказівки до виконання пункту 2.4.3

За результатами розрахунку побудувати обвідні до кривих струмів фази А (п. 1.1).

Розділити періодичні складові струмів раптового короткого замикання на складові: усталений струм короткого замикання, згасаючий струм перехідного режиму та згасаючий струм надперехідного режиму.

2.6 Зміст звіту

2.6.1 Аналіз математичної моделі синхронного генератора з новими початковими умовами.

2.6.2 Розрахунок режиму гасіння поля після РКЗ, графіки струмів та електромагнітного моменту в функції часу.

2.6.3 Графіки обвідних до кривих струмів фази А.

2.6.4 Висновки.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ФОРСУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ ТА ГАСІННЯ ПОЛЯ ПРИ РОЗІМКНЕНІЙ ОБМОТЦІ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи: дослідження перехідних процесів в колах обмоток ротора

3.1 Теоретичні відомості

Для утримання синхронної машини в синхронізації при зниженні напруги мережі, яке може статися при віддалених коротких замиканнях, застосовують форсування її струму збудження.

Форсування провадиться автоматичним релейним захистом машини, від якого надходить імпульс на вмикання контакторів Кф і К1ф (рис. 2.1). При цьому замикаються накоротко форсуючі резистори Rф і Rф', регульовальний резистор РР, і напруга на якорі збудника з великою швидкістю зростає до граничного значення $U_{зб\max}$ (рис. 3.1). Із запізненням, обумовленим постійною часу обмотки збудження синхронної машини, струм збудження досягає граничного значення

$$I_{зб\max} = I_{зб\text{ном}} \frac{U_{зб\max}}{U_{зб\text{ном}}}$$

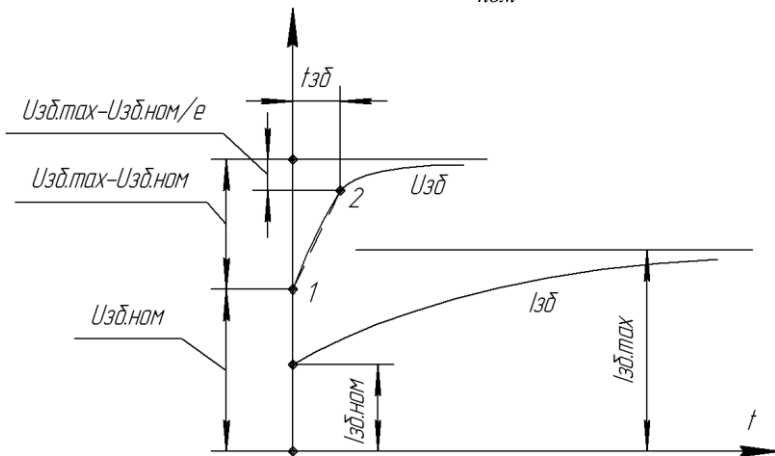


Рисунок 3.1 – Наростання напруги збудника та струму збудження при форсуванні збудження

Ефективність форсування збудження характеризується кратністю граничної сталої напруги збудника, під якою розуміється відношення найбільшої сталої напруги збудника $U_{зб\max}$ до номінальної напруги збудження, а також номінальною швидкістю наростання напруги збудника (на ділянці від точки 1 до точки 2 на рис. 3.1)

$$\left(1 - \frac{1}{e}\right) \cdot \frac{U_{зб\max} - U_{зб\text{НОМ}}}{U_{зб\text{НОМ}} \cdot t_{зб}}$$

Великі генератори й компенсатори повинні мати кратність граничної сталої напруги збудника 1.8...2.0 і номінальну швидкість наростання напруги збудника 1.5...2.0 номінальної напруги на контактних кільцях у секунду. Для інших синхронних машин кратність – не менш 1.4, швидкість – не менш 0.8 номінальної напруги в секунду.

Гасіння струму здійснюється як при нормальній експлуатації, так і у аварійних ситуаціях. Ці два процеси описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{зб}}{dt} &= \frac{U_{зб}}{x_{зб}} - \alpha_{зб} \cdot i_{зб} + k_{зб} \cdot \alpha_{\partial d} \cdot i_{\partial d} \\ \frac{di_{\partial d}}{dt} &= -k_{\partial d} \cdot \frac{U_{зб}}{x_{зб}} + k_{\partial d} \cdot \alpha_{зб} \cdot i_{зб} - \alpha_{\partial d} \cdot i_{\partial d} \\ \frac{di_{\partial q}}{dt} &= -\alpha_{\partial q} \cdot i_{\partial q} \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

де $x'_{зб}$, $x'_{\partial d}$ – перехідні опори обмоток збудження та демпферної;

$\alpha_{зб}$, $\alpha_{\partial d}$, $\alpha_{\partial q}$ – постійні часу затухання струмів обмоток збудження та демпферної;

$k_{зб}$, $k_{\partial d}$ – коефіцієнти приведення.

Перехідні опори обмоток збудження та демпферної

$$x'_{зб} = (x_d + x_{\sigma зб}) \cdot \sigma, \quad x'_{\partial d} = (x_d + x_{\sigma \partial d}) \cdot \sigma, \quad x'_{\partial q} = (x_q + x_{\sigma \partial q}) \cdot \sigma,$$

де σ – коефіцієнт розсіювання обмоток збудження і демпферної;

$$\sigma = 1 - \frac{x_d^2}{(x_d + x_{\sigma z\bar{b}}) \cdot (x_d + x_{\sigma \partial d})}.$$

Постійні часу затухання струмів обмоток збудження та демпферної

$$\alpha_{z\bar{b}} = \frac{R_{z\bar{b}}}{x'_{z\bar{b}}}, \quad \alpha_{\partial d} = \frac{R_{\partial d}}{x'_{\partial d}}, \quad \alpha_{\partial q} = \frac{R_{\partial q}}{x'_{\partial q}}.$$

Коефіцієнти приведення

$$k_{z\bar{b}} = \frac{x_d}{x_d + x_{\sigma z\bar{b}}}, \quad k_{\partial d} = \frac{x_d}{x_d + x_{\sigma \partial d}}.$$

Напруга на обмотці збудження

$$U_{z\bar{b}} = \left(x_d \cdot \frac{di_{z\bar{b}}}{dt} + x_d \cdot \frac{di_{\partial d}}{dt} - x_q \cdot i_{\partial q} \right) \cos \Theta - \left(x_q \cdot \frac{di_{\partial q}}{dt} + x_d \cdot i_{z\bar{b}} + x_d \cdot i_{\partial d} \right) \sin \Theta,$$

Кут положення ротора

$$\Theta = \Theta_n + t,$$

де Θ_n – кут, що визначає початкове положення ротора.

3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою «Перехідні процеси в колах ротора», ознайомитись з матеріалом п. 3.1 та [3] - [5] підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки

3.3.1 Задля чого та при яких умовах застосовують форсування струму збудження синхронного генератора?

3.3.2 Як впливає початкова величина напруги збудження $U_{z\bar{b}n}$ на час форсування збудження?

3.3.3 Як впливає величина $R_{z\bar{b}}$ на процес гасіння поля?

3.3.4 Система диференційних рівнянь, якою можна описати гасіння струму як при нормальній експлуатації, так і у аварійних ситуаціях.

3.4 Програма роботи

3.4.1 Проаналізувати математичну модель синхронного генератора при форсуванні збудження.

3.4.2 Провести на ЕОМ розрахунок зміни струмів в обмотках збудження та демпферній, а також зміни напруги обмотки статора при зміні напруги в обмотці збудження.

3.4.3 Дослідити гасіння поля при розімкненій обмотці статора.

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Індивідуальні початкові данні вибрати з таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Індивідуальні початкові данні (у в.о.)

Місце цифри за варіантом	Початкова напруга обмотки збудження $U_{зб1}$	Індуктивні опори				
		по поздовжній осі x_d	по поперечній осі x_q	розсіювання		
				обмотки збудження $x_{\sigma зб}$	демпферної обмотки по поздовжній осі $x_{\sigma dd}$	демпферної обмотки по поперечній осі $x_{\sigma dq}$
1	2	3	4	5	6	
Цифра 1	0.004	1.2	0.8	0.035	0.08	0.06
Цифра 2	0.005	1.3	0.9	0.4	0.1	0.07

Таблиця 3.2 – Початкові данні для всіх варіантів (у в.о.)

Номінальні активні опори:	
обмотки збудження	$R_{зб} = 0.04$
демпферної обмотки: по поздовжній осі d	$R_{\delta d} = 0.05$
по поперечній осі q	$R_{\delta q} = 0.03$

3.5.1 Провести аналіз математичної моделі синхронного генератора при форсуванні збудження.

3.5.2 Провести розрахунок зміни струмів в обмотках – збудження та демпферній, а також зміни напруги обмотки статора при

зміні напруги в обмотці збудження.

Початкові струми збудження та демпферної обмотки

$$i_{3\bar{b}_n} = \frac{U_{3\bar{b}1}}{R_{3\bar{b}}}, \quad i_{\bar{d}d_n} = i_{\bar{d}q_n} = 0.$$

Дослідження провести для двох значень кута повороту ротора $\Theta = 0$ та $\Theta = \pi/2$ при кінцевих значеннях напруги:

$$U_{3\bar{b}2} = 2 \cdot U_{3\bar{b}1}, 3 \cdot U_{3\bar{b}1}, 4 \cdot U_{3\bar{b}1}, 5 \cdot U_{3\bar{b}1}.$$

Побудувати залежності $i_{3\bar{b}}, i_{\bar{d}d}, i_{\bar{d}q} = f(t)$ для одного із значень $U_{3\bar{b}2}$ за завданням викладача та визначити залежність $t = f(U_{3\bar{b}1})$, де t – час за який $U_{3\bar{b}} = 1$.

3.5.3 Провести дослідження гасіння поля при розімкненій обмотці статора.

Початкові умови: $i_{3\bar{b}_n} = \frac{U_{3\bar{b}1}}{R_{3\bar{b}}}, i_{\bar{d}d_n} = i_{\bar{d}q_n} = 0, U_{3\bar{b}2} = 0.$

Дослідження гасіння поля провести для двох значень кута повороту ротора $\Theta = 0$ та $\Theta = \pi/2$ при трьох значеннях опорів обмотки збудження: $R_{3\bar{b}} = 100 \cdot R_{3\bar{b}_n}, 4 \cdot R_{3\bar{b}_n}, R_{3\bar{b}_n}.$

При $R_{3\bar{b}} = 4 \cdot R_{3\bar{b}_n}$ побудувати залежності $i_{3\bar{b}}, i_{\bar{d}d}, i_{\bar{d}q} = f(t).$

Для кожного режиму гасіння (різних значень $R_{3\bar{b}}$) визначити час затухання струму збудження.

3.6 Зміст звіту

3.6.1 Аналіз математичної моделі.

3.6.2 Розрахунок зміни струмів в обмотках збудження, демпферній, зміни напруги обмотки статора при зміні напруги в обмотці збудження. Графіки залежностей $i_{3\bar{b}}, i_{\bar{d}d}, i_{\bar{d}q} = f(t)$ та $t = f(U_{3\bar{b}1}).$

3.6.3 Розрахунок режиму гасіння поля при розімкненій обмотці статора. Графіки залежностей $i_{3\bar{b}}, i_{\bar{d}d}, i_{\bar{d}q} = f(t).$

3.6.4 Висновки.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ПУСК ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідження перехідних процесів при пуску та впливу вихідних даних двигуна на їх характер

4.1 Теоретичні відомості

Проведемо дослідження двигуна постійного струму (рис. 4.1).

Розрахунок перехідних процесів в двигунах з паралельним збудженням та послідовною стабілізуючою обмоткою на головних полюсах описується нелінійною системою диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{array}{l} \text{рівняння напруги} \\ \text{якірного ланцюга} \\ \Rightarrow U = C_e n \Phi + i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2p W_{\text{з}2} \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} \\ \text{рівняння напруги} \\ \text{обмотки збудження} \\ \Rightarrow U = i_{\text{з}} R_{\text{з}} - 2p \sigma W_{\text{з}1} \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} \\ \text{рівняння} \\ \text{магнітних потоків} \\ \Rightarrow \Phi = \Phi_{\mu} - \Phi_{\text{р}я} \\ \text{рівняння моментів} \\ \text{на валу двигуна} \\ \Rightarrow \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = C_{\text{м}} \Phi i_{\text{я}} - M_{\text{о}} \end{array} \right\}, \quad (4.1)$$

де U – напруга мережі,

W ; C_e , $C_{\text{м}}$ – конструктивні постійні двигуна;

n – частота обертання, об./хв.;

$i_{\text{я}}$, $i_{\text{зб}}$ – відповідно струми якоря та збудження, А;

$R_{\text{я}}$ – активний опір якірного ланцюгу, Ом;

$L_{\text{я}}$ – індуктивність якірного ланцюгу, Гн;

$2p$ – кількість полюсів;

$W_{\text{зб}1}$, $W_{\text{зб}2}$ – витки паралельної та послідовної обмоток;

$R_{\text{зб}}$ – активний опір паралельної обмотки збудження, Ом; σ – коефіцієнт розсіювання головних полюсів;

Φ , Φ_{μ} , $\Phi_{\text{р}я}$ – магнітні потоки: результуючий, обмотки збудження, реакції якоря, Вб;

GD^2 , $M_{\text{о}}$ – маховий момент двигуна та момент опору, кг·м².

Індуктивність якоря залежить від насичення магнітного кола машини та в загальному випадку є змінною величиною, що значно ускладнює рішення системи рівнянь (4.1).

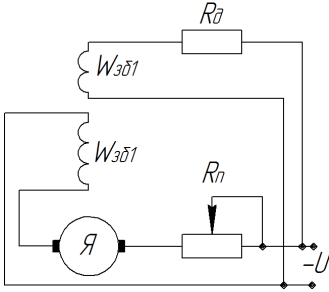


Рисунок 4.1 – Схема двигуна постійного струму зі змішаним збудженням

Тому приймається індуктивність якоря $L_{я}$, що дорівнює середньому значенню індуктивності за час перехідного процесу.

$$\text{Складова} \quad 2p\sigma W_{3\delta 2} \frac{d\Phi_{\mu}}{dt}$$

пропорційна струму збудження, але в більшості випадків вона дуже мала з-за малої кількості витків $W_{3\delta 2}$.

При дослідженнях перехідних процесів зручно користуватися системою відносних одиниць. Система рівнянь (4.1) у відносних одиницях має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{я}}{dt} &= A_1 - A_2 i_{я} - A_3 n \Phi - A_4 i_{3\delta} \\ \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} &= A_5 - A_6 i_{3\delta} \\ \frac{dn}{dt} &= A_7 \Phi i_{я} - A_8 \\ i_{3\delta} &= i_{\mu} - A_3 i_{я} i_{вс} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} &= A_5 - A_6 i_{3\delta} \\ \frac{dn}{dt} &= A_7 \Phi i_{я} - A_8 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$\frac{dn}{dt} = A_7 \Phi i_{я} - A_8 \quad (4.4)$$

$$i_{3\delta} = i_{\mu} - A_3 i_{я} i_{вс} \quad (4.5)$$

де

$$A_1 = \frac{U}{L_{я} I_{яноч}}; \quad A_2 = \frac{R_{я} + R_{\delta}}{L_{я}}; \quad A_3 = \frac{C_e n_n \Phi_n}{L_{я} I_{яноч}}; \quad A_4 = 2pK \cdot W_{3\delta 2} \sigma \frac{d\Phi_n}{dt};$$

$$A_5 = \frac{U}{2pW_{3\delta 1} \sigma \Phi_n}; \quad A_6 = \frac{(R_{3\delta} + R_{\delta}) I_{3\delta n}}{2pW_{3\delta 1} \sigma \Phi_n}; \quad A_7 = \frac{375 \cdot C_M \Phi_n I_n}{GD^2 n_n}; \quad A_8 = \frac{375 \cdot M_o}{GD^2 n_n};$$

$$A_9 = \frac{W_{3\delta 2}}{W_{3\delta 1}}; \quad A_{10} = \frac{2p \cdot W_{3\delta 1} \Phi_n}{I_{3\delta n} R_{вс}}$$

Для знаходження впливу вихрових струмів (у (4.5))

$$i_{зб} = A_{10} \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} \quad (4.6)$$

проведемо апроксимацію характеристики неробочого ходу $\Phi_{\mu} = f(i_{\mu})$ (рис. 4.2 у в.о.) трьома лінійними функціями

$$\begin{aligned} i_{\mu} &= B_0 \Phi_{\mu} & \text{за умови} & & 0 \leq \Phi_{\mu} \leq C_1 \\ i_{\mu} &= B_1 \Phi_{\mu} - D_1 & \text{за умови} & & C_1 \leq \Phi_{\mu} \leq C_2 \\ i_{\mu} &= B_2 \Phi_{\mu} - D_2 & \text{за умови} & & \Phi_{\mu} \geq C_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Постійні коефіцієнти B_i , C_i , D_i визначаються з кривої неробочого ходу.

Методика визначення цих коефіцієнтів базується на рівнянні прямої. На першій ділянці пряма проходить через початок координат, а на другій та третій – через дві відомі нам точки (рис. 4.2, 4.3)

$$\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} = \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} \quad \text{тобто} \quad \frac{i_{\mu} \text{ (або } i_{я}) - x_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{\Phi_{\mu} \text{ (або } \Phi_{ря}) - y_i}{y_{i+1} - y_i} \quad (4.8)$$

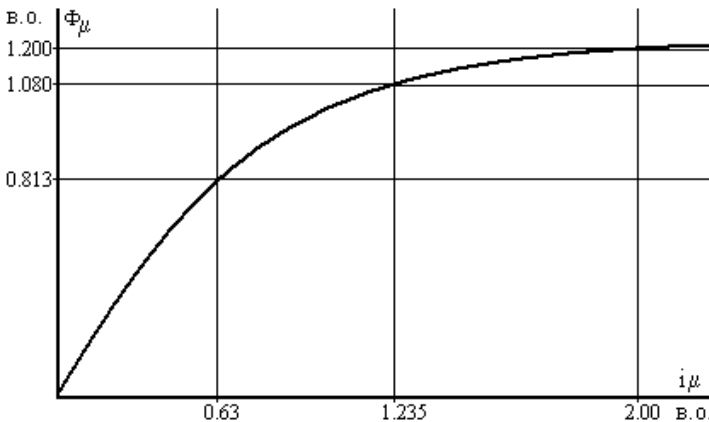


Рисунок 4.2 – Характеристика неробочого ходу

Для знаходження результуючого магнітного потоку (у (4.2), (4.4))

$$\Phi = \Phi_{\mu} - \Phi_{р\text{я}} \quad (4.9)$$

проведемо апроксимацію характеристики $\Phi_{р\text{я}} = f(i_{\text{я}})$ (рис. 4.3 у відносних одиницях) трьома лінійними функціями

$$\begin{aligned} \Phi_{р\text{я}} &= E_0 i_{\text{я}} && \text{за умови} && 0 \leq i_{\text{я}} \leq H_1 \\ \Phi_{р\text{я}} &= E_1 i_{\text{я}} - F_1 && \text{за умови} && H_1 \leq i_{\text{я}} \leq H_2 \\ \Phi_{р\text{я}} &= E_2 i_{\text{я}} - F_2 && \text{за умови} && i_{\text{я}} \geq H_2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Постійні коефіцієнти E_i , F_i , H_i визначаються із залежності $\Phi_{р\text{я}} = f(i_{\text{я}})$ за пропорцією (4.8).

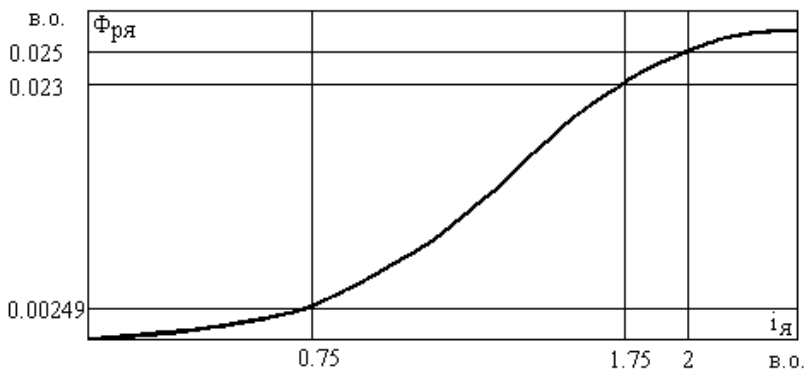


Рисунок 4.3 – Залежність $\Phi_{р\text{я}} = f(i_{\text{я}})$

При вирішенні перехідного процесу на ЕОМ розраховують всі коефіцієнти рівнянь та задають початкові умови для струму якоря, залишкового магнітного потоку, частоти обертання якоря та початкових змін магнітного потоку.

4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Пуск двигуна постійного струму». Ознайомитись з матеріалом п. 4.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки

4.3.1 Як впливає реакція якоря на характер проходження перехідного процесу?

4.3.2 Як впливає маховий момент двигуна на процес пуску?

4.3.3 Обґрунтуйте причину виникнення вихрових струмів в масивних елементах конструкції двигуна при перехідних процесах?

4.3.4 Як впливає величина $R_{зб}$ на процес гасіння поля?

4.3.5 Система диференційних рівнянь, якою можна описати гасіння струму як при нормальній експлуатації, так і у аварійних ситуаціях.

4.3.6 Розрахунок перехідних процесів в двигунах з паралельним збудженням та послідовною стабілізуючою обмоткою на головних полюсах.

4.3.7 Як можна керуватися впливом реакції якоря задля поліпшення конструкції двигуна постійного струму?

4.3.8 В чому полягає доцільність використання двигунів постійного струму?

4.3.9 В чому полягає доцільність безреостатного пуску двигуна постійного струму при послабленому полі?

4.4 Програма роботи

4.4.1 Дослідити математичну модель двигуна постійного струму.

4.4.2 Провести безреостатний пуск двигуна постійного струму.

4.4.3 Провести безреостатний пуск двигуна постійного струму при послабленому полі.

4.4.4 Провести реостатний пуск двигуна постійного струму.

4.4.5 Порівняти результати розрахунків.

4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Загальні дані обираються з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Загальні дані двигуна постійного струму ($p = 2$)

Потужність двигуна, кВт	$P_n = 8$
Напруга, В	$U = 220$
Постійна ЕРС	$C_e = 16.5$
Механічна постійна	$C_m = 158$
Число витків паралельної обмотки збудження	$W_{31} = 860$
Число витків послідовної обмотки збудження	$W_{32} = 8$
Коефіцієнт розсіювання головних полюсів	$\sigma = 1.15$
Частота обертання якоря, об./хв.	$n_n = 1500$
Активний опір обмотки збудження, Ом	$R_3 = 137.7$

Індивідуальні дані обираються з таблиці 4.2 за варіантом.

Таблиця 4.2 – Індивідуальні початкові дані

Місце цифри за варіантом	Номінальний струм якоря $i_{я}, А$	Номінальний струм обмотки збудження $i_{зб}, А$	Активний опір обмотки якоря $R_{я}, Ом$	Індуктивність якоря $L_{я}, Гн$	Момент інерції $GD^2,$ кг·м ²	Загальний магнітний потік $\Phi_n, Вб$
	1	2	3	4	5	6
Цифра 1	40	1.6	0.55	0.02	1.5	$8 \cdot 10^{-3}$
Цифра 2	35	1.5	0.5	0.015	1	$6 \cdot 10^{-3}$

4.5.1 Дослідити математичну модель двигуна постійного струму п. 4.1 (4.1).

4.5.2 Користуючись математичною моделлю виконати безреостатний пуск двигуна постійного струму.

Для цього розрахувати коефіцієнти $A_1 - A_0$ рівнянь математичної моделі (4.2) – (4.5) за початковими даними у відносних одиницях.

Початкові дані:

- активний опір паралельної обмотки збудження $R_{\partial} = 0$
- активний опір пускового реостату $R_n = 0$
- момент навантаження на валу $M_o = 0$

Вплив вихрових струмів та опорів послідовної обмотки збудження на струм якоря $R_{\partial c} = \infty$
 $K = 0$

Розрахувати постійні коефіцієнти B_i, C_i, D_i та E_i, F_i, H_i за методикою (4.6) – (4.10).

Провести безреостатний пуск двигуна за програмою МРТ.ЕХЕ, прийнявши наступні початкові умови.

Початкові умови%

- струм якоря $I_{япоч} = 0$
- частота обертання якоря $n = 0$
- залишковий магнітний потік $\Phi_3 = 0.03$

Початкові зміни магнітного потоку визначити з рівняння (4.3) після розрахунку коефіцієнтів A_5 та A_6 . $\frac{d\Phi_{\mu}}{dt}$

В даному режимі впливом вихрових струмів та опорів послідовної обмотки збудження на струм якоря знехтувати. Пуск здійснити при нормальному полі $R_{\partial} = 0$ в режимі неробочого ходу.

Пуск виконати до сталого значення магнітного потоку, при цьому зняти осцилограми зміни струмів якоря, збудження, частоти обертання двигуна та результуючого магнітного потоку в функції часу.

4.5.3 Користуючись математичною моделлю виконати безреостатний пуск двигуна постійного струму при послабленому полі.

Виконати пуск двигуна при тих самих початкових даних, що й в п. 4.5.2, за винятком активного опору паралельної обмотки збудження – $R_{\partial} = 50$ Ом та коефіцієнту A_6 , який від нього залежить.

Зняти осцилограми струмів якоря, збудження, частоти обертання двигуна та результуючого магнітного потоку в функції часу.

4.5.4 Виконати реостатний пуск двигуна постійного струму при тих самих початкових даних, що й в п. 4.5.2 за винятком активного опору пускового реостату – $R_n=3$ Ом та коефіцієнту A_2 , який від нього залежить.

Зняти осцилограми струмів якоря, збудження, частоти обертання двигуна та результуючого магнітного потоку до моменту часу t_i , при якому струм якоря почне зменшуватися.

Виписати з таблиці результатів нові початкові умови $i_{я}|_{поч} = i_{я}|_{t_i}$; $n|_{поч} = n|_{t_i}$.

Розрахувати значення $\Phi_{\mu}|_{поч}$ за наступною методикою

$$i_{\mu}|_{t_i} = i_{зб}|_{t_i} + A_9 i_{я}|_{t_i} \quad \begin{array}{l} \text{якщо} \quad i_{\mu}|_{t_i} < 0.63 \quad \text{то} \quad \Phi_{\mu}|_{поч} = \frac{1}{B_0} i_{\mu}|_{t_i} \\ \text{якщо} \quad 0.63 < i_{\mu}|_{t_i} < 1.235 \quad \text{то} \quad \Phi_{\mu}|_{поч} = \frac{1}{B_1} i_{\mu}|_{t_i} + \frac{D_1}{B_1} \end{array}$$

Значення похідної магнітного потоку обмотки збудження

розрахувати по двом точкам $\frac{d\Phi_{\mu}}{dt}|_{поч} = \frac{\Phi_{\mu}|_{t_i} - \Phi_{\mu}|_{t_{i-1}}}{0.001}$

Після визначення нових початкових умов перерахувати коефіцієнти, які від них залежать.

Прийняти $R_n=2$ Ом та перерахувати коефіцієнт A_2 .

Після чого виконати повторний пуск з новими початковими даними та початковими умовами.

Повторні пуски здійснити декілька разів, кожен раз зменшуючи R_n та перераховуючи коефіцієнти та початкові умови. При $R_n = 0$ здійснити пуск до встановленого значення магнітного потоку.

У всіх режимах зняти осцилограми вихідних параметрів в функції часу.

Побудувати загальну осцилограму зміни струмів якоря, збудження, частоти обертання та магнітного потоку. При цьому нульове значення часу кожного попереднього пуску прийняти рівним t_i , тобто моменту часу попереднього пуску.

4.5.5 Порівняти результати розрахунків за пп. **4.5.2**, **4.5.3**, **4.5.4**. Зробити висновки.

4.6 Зміст звіту

- 4.6.1** Аналіз математичної моделі двигуна постійного струму.
- 4.6.2** Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь двигуна.
- 4.6.3** Осцилограми пуску.
- 4.6.4** Обробка результатів осцилограм.
- 4.6.5** Висновки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

Базова

1 Моделювання електромеханічних систем [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська, В. В. Котлярова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: X,XX Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 253 с.

2 Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

3 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

4 Чорний О. П., Луговой А. В. и др. Моделювання електромеханічних систем Підручник / Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. – Кременчук, 2001. – 410 с.

5 Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

6 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

Допоміжна

7 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання . Частина 1 / Укл.: Т. П. Солодовнікова, С.О. Лапкіна, І.Д. Галушко. – Запоріжжя : НУЗП, 2023– 32 с.

8 Методичні вказівки з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» та виконання самостійних та практичних завдань для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні

машини і апарати») усіх форм навчання. / Укл. : Т. П. Солодовнікова, С. О. Лапкіна . – Запоріжжя : НУЗП, 2023. – 34 с.

9 Яримбаш, Д. Особливості тривимірного моделювання електромагнітних полів асинхронного двигуна / Д. С. Яримбаш, М. І. Коцур, С. Т. Коцур, І. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2016. – № 2. - С. 43-50. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2016-2-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5).

10. Літвінов, Д. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. - С. 71-78. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-1-9](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-9).

11. Яримбаш, Д. Особливості визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна для режиму короткого замикання / Д. С. Яримбаш, М. І. Коцур, С. Т. Коцур, І. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. - С. 24-30. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-1-4](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4).

12. Паталах, Д. Числовий безітераційний метод моделювання електромеханічних процесів в асинхронних двигунів / Д. Паталах, С. Тиховод, Т. Корнус // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 2. - С. 50-55. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-2-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-5).