

Міністерство освіти і науки України
Інженерний науково навчальний інститут ЗНУ

Кафедра ЕКФС

Електродинамічні процеси в гідроенергетиці
Лабораторний практикум

Запоріжжя
2024

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Лабораторна робота № 1 Дослідження динамічних характеристик гідрогенератора	4
Лабораторна робота № 2 Динамічні впливи системи збудження гідрогенератора	8
Лабораторна робота № 3 Дослідження динамічних властивостей системи генерації ГЕС	13
Лабораторна робота № 4 Дослідження симетричного КЗ	16
Лабораторна робота № 5 Дослідження несиметричного КЗ	19
Література	23

ВСТУП

Лабораторний практикум з дисципліни «Електродинамічні процеси в гідроенергетиці» є її важливою практичною складовою. Основною метою є закріплення теоретичних знань та набуття практичного досвіду роботи з електричним обладнанням гідроелектростанцій та його взаємодією з енергетичною системою.

Методичні вказівки містять набір лабораторних робіт, у яких наведено основні теоретичні відомості, схеми досліджень, вимоги до експерименту та обробки й оформлення результатів. Кількість та послідовність виконуваних на лабораторних заняттях робіт визначається навчальними планами в залежності від кількості годин лабораторних занять.

Під час виконання лабораторних робіт студенти мають:

- опанувати принципи роботи, призначення та конструктивні особливості досліджуваного обладнання;
- навчитись самостійно складати схеми дослідження пристроїв та процесів;
- навчитись визначати основні динамічні характеристики обладнання за умов зміни параметрів.

Лабораторні роботи орієнтовані на MatLab Simulink.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Гідроенергетика» денної та заочної форм навчання, а також можуть бути корисними для студентів суміжних енергетичних та електротехнічних спеціальностей.

надперехідному опорі генератора, E_q – вектор синхронної ЕРС генератора. Він відповідає сумі векторів напруги генератора й падіння напруги на його синхронному опорі. E'' – вектор надперехідної ЕРС генератора. Він відповідає сумі векторів напруги генератора й падіння напруги на його надперехідному опорі.

1. 2. Опис лабораторної установки

Схема S-моделі наведена на рис. 1. 2.

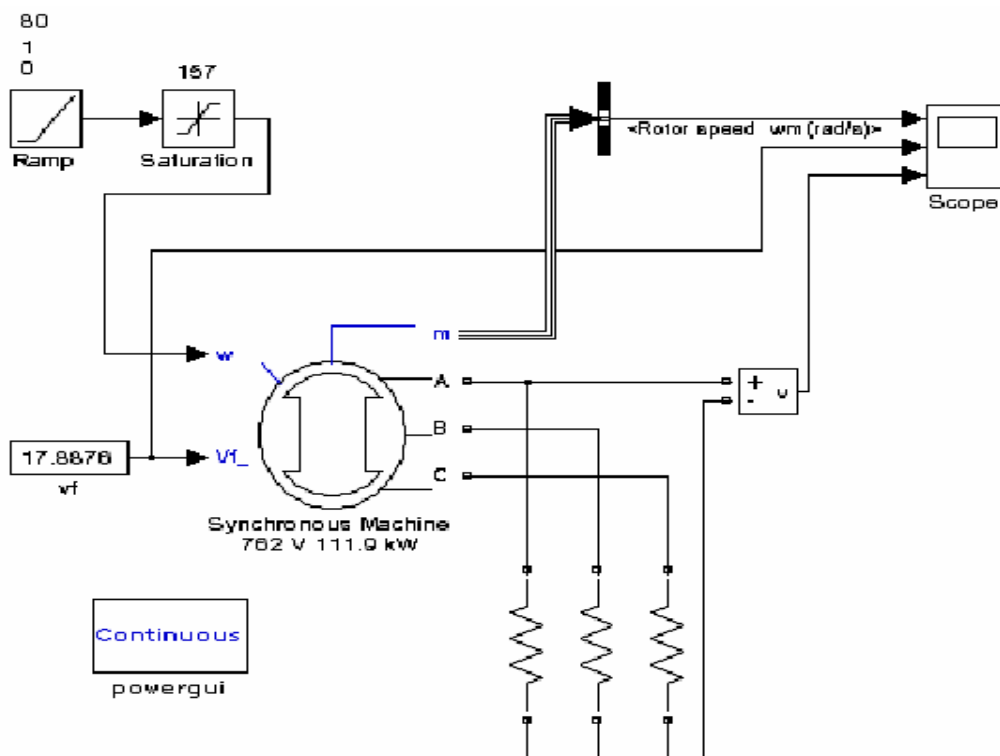


Рис. 1. 2 Схема імітаційної моделі СГ.

Приклад налагодження блоку СГ наведено на рис. 1. 3.

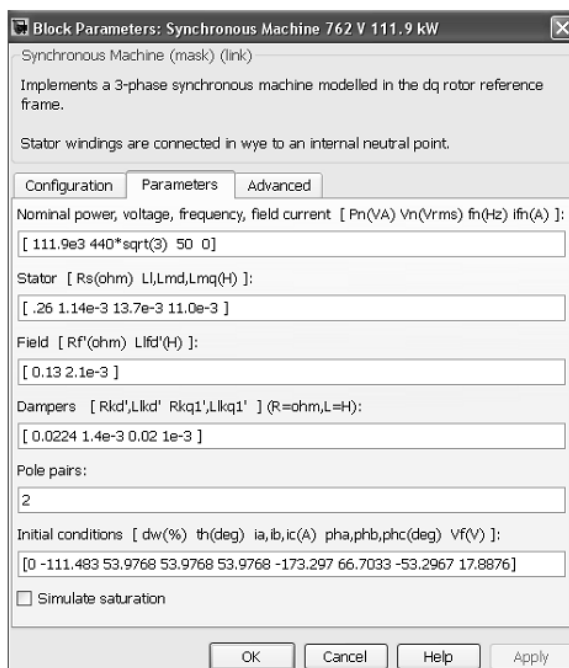


Рис. 1. 3 Приклад налагодження блоку СГ

1. 3. Зміст роботи

1. Зібрати й налагодити схему експериментальної моделі.
2. Провести дослід пуску СГ до сталих значень параметрів.
3. Провести дослід підключення номінального навантаження.

1. 4. Вказівки до виконання роботи

Провести дослід пуску СГ до сталого значення швидкості, побудувати залежності електромагнітних та електромеханічних процесів $\omega(t)$, $M(t)$, $i_{SA}(t)$, $u_{SA}(t)$ для режиму розгону.

Перевірити в сталому режимі розрахункову залежність за формулою для вихідної частоти f генератора від швидкості ω та числа p пар полюсів.

$$\left. \begin{aligned} n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] &= \frac{60f}{p}, \\ \omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] &= \frac{2\pi f}{p} \end{aligned} \right\}$$

Побудувати графіки залежності частоти ω й амплітуди U_{sm} напруги $u_{SA}(t)$ від значень швидкості ω ротора синхронного генератора. При цьому табличний ряд заданих значень швидкості дорівнює: $0,1 \omega_n$; $0,2 \omega_n$; $0,3 \omega_n$; $0,4 \omega_n$; $0,5 \omega_n$; $0,6 \omega_n$; $0,6 \omega_n$; $0,7 \omega_n$; $0,8 \omega_n$; $0,9 \omega_n$; $1,0 \omega_n$; $1,1 \omega_n$.

Провести дослід підключення навантаження (близького за статорними струмами до номінального) в сталому режимі роботи та дослідження залежності вихідної напруги u_A (де $u_A = U_{sm}/\sqrt{2}$) генератора при зміні напруги U_3 збудження генератора (від 50% до 150% від її номінального значення U_{sm}).

Проводимо аналіз отриманих даних. Оформляємо звіт й висновок.

1. 5. Порядок виконання роботи

Виконання роботи починається складанням схеми моделі. Провести дослід згідно змісту та вказівок до виконання. Результати занести до таблиць. Одержані часові діаграми скопіювати до звіту.

1. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
- Короткий опис. Схема і умови експерименту;
- План і дані досліджень;
- Обробка результатів. Характеристики і графіки;
- Висновки і рекомендації.

Контрольні питання

- 1 Конструктивні особливості гідрогенератора.
- 2 Складові перехідного процесу.
- 3 Поясніть принцип дії синхронної машини.

- 4 Які динамічні характеристики гідрогенератора визначальні?
- 5 Що визначає інерційність енергетичного перетворювача?
- 6 Особливості вимірювань динамічних складових?
- 7 Вплив інерційності системи збудження.

Лабораторна робота № 2

Динамічні впливи системи збудження гідрогенератора

Мета роботи: дослідження динамічних впливів системи збудження.

2. 1. Короткі теоретичні відомості

Система збудження безпосередньо впливає на динамічні якості системи генерації загалом. Структурна схема автоматичної системи з регулятором збудження (АРЗ) наведена на рис. 2. 1.

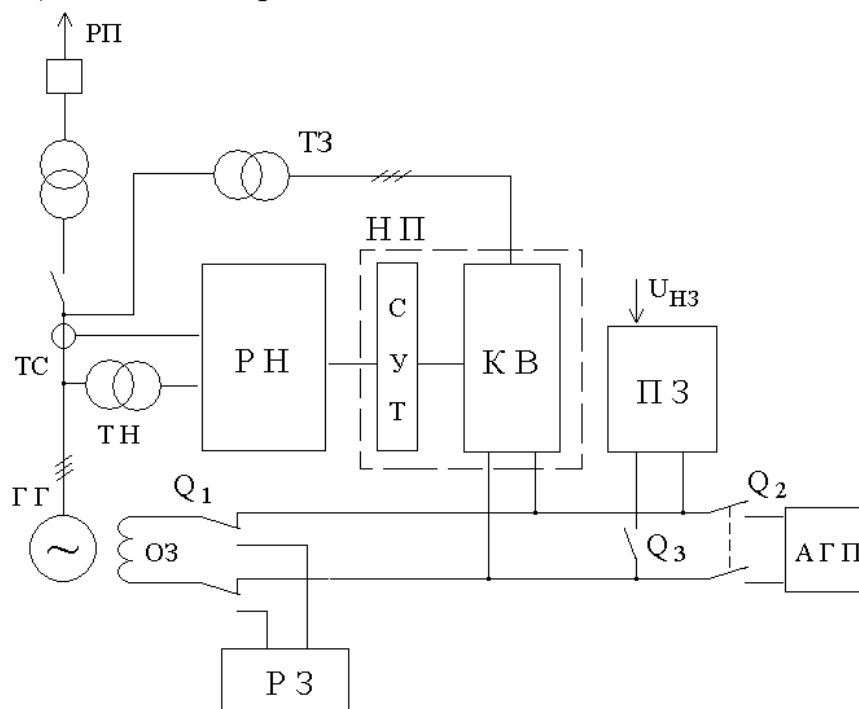


Рис. 2. 1 Узагальнена структура статичного АРЗ:

ГГ – гідрогенератор; РП – розподільчий пристрій; ТЗ, ТС, ТН – відповідно трансформатори: збудження, струму й напруги; РН – регулятор напруги; НП – напівпровідниковий перетворювач; КВ – керований випрямляч; СУТ – система управління тиристорами; ОЗ – обмотка збудження; РЗ – резервне збудження; ПЗ – початкове збудження; АГП – автомат гасіння поля.

Гідрогенератори оснащені пристроями АРЗ. Тому при зниженні напруги на шинах генератора в результаті КЗ АРЗ намагається його відновити шляхом збільшення струму збудження генератора. При зростанні струму збудження росте ЕРС генератора й, як наслідок, росте напруга статора. Огинаюча крива перехідного процесу відновлення напруги статора має вигляд, рис. 2. 2.

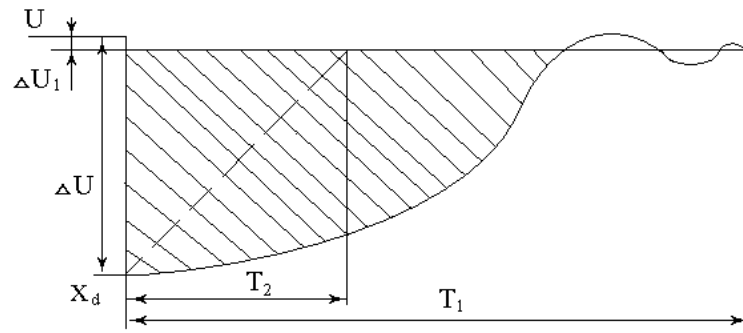


Рис. 2. 2. Характеристики перехідного процесу відновлення напруги

У нормальному режимі напруга гідрогенератора дорівнює ЕРС U , яка під дією навантаження у сталому режимі зменшується на ΔU_1 .

У момент включення навантаження відбувається падіння напруги ΔU на X_d гідрогенератора. АРЗ забезпечує відповідне форсування збудження, яке згідно нормативів складає

$$I_{fMAX} = (1,8...2,0) I_f.$$

Характер відновлення напруги (перехідного процесу) та його протяжність і втрати суттєво залежать від інерційності кола збудження. Для інерційних АРЗ час відновлення складає T_1 , а втрати відповідні заштрихованій ділянці. Заміна сталої часу АРЗ на технологічну затримку сигналу керування на пів періоду здатна суттєво скоротити час до T_2 , втрати й характер перехідного процесу (пунктир).

Оскільки РН є частиною системи самозбудження СЗ його інерційність підвищує загальну інерційність системи генерації ГЕС, рис. 2. 3.

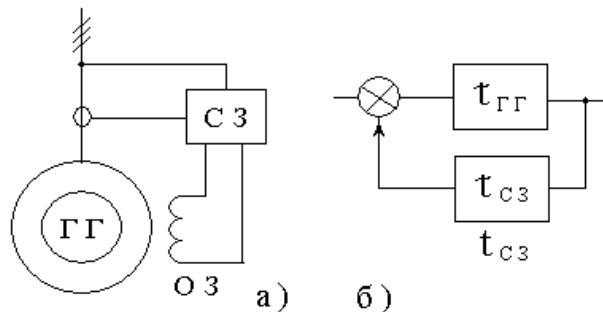


Рис. 2. 3. Структура збудження ГГ

Регулятори, побудовані на основі ПІД законів містять інтегральні і диференціальні складові формувачів управління і за своєю фізичною природою й суттю інерційні. У такому випадку, може йтися тільки про особливості налагодження, що принципово не змінює їх інерційної суті.

Існуючі принципи вимірювань відхилень змінної напруги і струму також інерційні.

При цьому слід зазначити принципову відмінність у реакціях систем управління на інерційність і запізнювання контрольованих сигналів. Так, якщо порівнювати вплив двох сигналів з еквівалентними часовими характеристиками, але різним характером зміни, то виявиться, що дія їх суттєво різна. На рис. 2. 4 наведено два сигнали рівної тривалості, але один інерційний з постійною часу τ , а інший,

зображений пунктиром – із запізнюванням t (затримка прямокутного імпульсу).

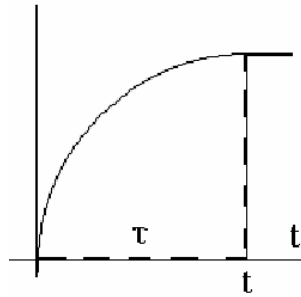


Рис. 2. 4. Характер зміни сигналу керування

Прояв інерційності сигналу управління в колі зворотного зв'язку будь-якої системи здатний змінювати її порядок і сприяти коливанням. Це обумовлює проблеми стійкості генерації, обмежує форсування збудження й проявляє інші істотні проблеми системного порядку.

Технологічна затримка сигналу управління, на відміну, практично не позначається на динамічних якостях системи регулювання. Вона складається з відповідних складових процесу збудження.

Динаміка перехідного процесу гідрогенератора істотно залежить не тільки від енергетики збудження, а й характеру реагування та її використання, зокрема, від режимів форсування збудження. При цьому існують нормативні обмеження у вигляді відомих двократних значень для гідрогенераторів. Очевидно, що маються на увазі діючі значення сигналів в обмотці збудження. Оскільки дані обмеження доволі застарілі слід їх переглянути.

Застосування статичних перетворювачів внесло істотні корективи до практики реалізації збудження синхронних машин, особливо його динамічної складової. Істотною особливістю є імпульсна їх дія на обмотку збудження. Це дозволяє забезпечувати миттєві значення форсування збудження що істотно перевищують обмежені двократні і відповідно прискорює процес.

Це навіть при нормованих двократних діючих значеннях дає можливість використовувати резерви, підвищувати якісні характеристики перехідних процесів і динамічну ефективність енергетичного перетворювача. Можливо і перевищення вказаних обмежень, що обгрунтоване критеріями механічної міцності основних елементів ротора, що також підвищує загальну ефективність системи регулювання напруги. Основним критерієм має бути забезпечення енергетичних потреб збудження гідрогенератора

2. 2. Опис лабораторної установки

Схема S-моделі наведена на рис. 2. 5.

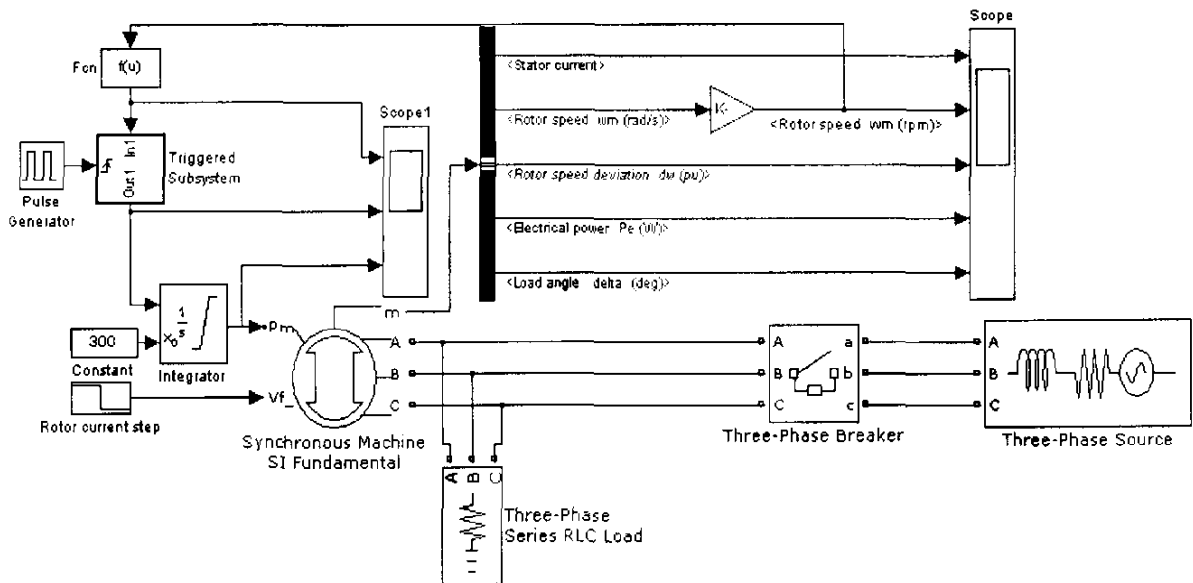


Рис. 2. 5 Схема імітаційної моделі СГ.

2. 3. Зміст роботи

1. Зібрати й налагодити схему експериментальної моделі.
2. Провести дослід навантаження СГ з інерційною СЗ.
3. Провести дослід підключення номінального навантаження з неінерційною СЗ.
4. Дослідити вплив форсування збудження на динаміку перехідного процесу.

2. 4. Вказівки до виконання роботи

В сталому режимі ХХ дослідити залежності електромагнітних та електромеханічних процесів $\omega(t)$, $M(t)$, $i_{SA}(t)$, $u_{SA}(t)$ при включенні навантаження та зміни його характеру (R, L, C та їх комбінацій).

Провести дослід підключення навантаження (близького за статорними струмами до номінального) в сталому режимі роботи та дослідження залежності вихідної напруги u_A генератора при зміні напруги U_3 збудження АРЗ генератора (від i_f до 150% від її номінального значення U_{sm}).

Дослідити протяжність перехідного процесу відновлення напруги за дії навантаження з інерційною та неінерційною (технологічною затримкою на $\frac{1}{2}$ періоду) та зміною форсування збудження.

Провести аналіз отриманих даних. Оформити звіт й висновок.

2. 5. Порядок виконання роботи

Виконання роботи починається складанням схеми моделі. Проводити налагодження блоку збудження для кожного досліду. Провести дослід згідно змісту та вказівок до виконання. Результати занести до таблиць. Одержані часові діаграми скопіювати до звіту.

2. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
- Короткий опис. Схема і умови експерименту;
- План і дані досліджень;
- Обробка результатів. Характеристики і графіки;
- Висновки і рекомендації.

Контрольні питання

1. Склад та характеристики системи збудження
2. Основні параметри перехідного процесу
3. Вплив інерційності збудження на динамічні характеристики
4. Вплив характеру навантаження на параметри перехідного процесу.
5. Відміна технологічної затримки від сталої часу.

Лабораторна робота № 3

Дослідження динамічних властивостей системи генерації ГЕС

Мета роботи: дослідження динамічних впливів систем керування гідроагрегату ГЕС.

3. 1. Короткі теоретичні відомості

Система збудження та регулятор швидкості гідроагрегату безпосередньо впливають на динамічні якості системи генерації, рис. 3. 1.

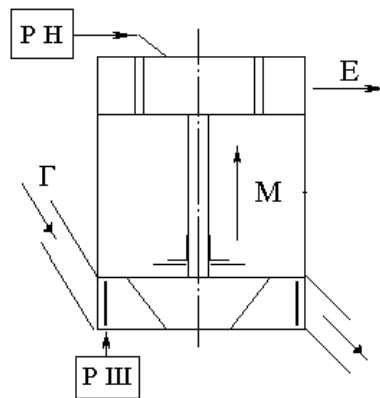


Рис. 3. 1. Регулятори гідроагрегату ГЕС.

Регулятори швидкості (навантаження) РШ та напруги РН являють собою PID – регулятори, які принципово є інерційними елементами відповідного кола керування.

При пуску гідроагрегату збудження генератора відсутнє. Процес пуску при точній синхронізації виконується наступним чином:

виконується плавний розгін ротора синхронного генератора від нульової до підсинхронної швидкості $\omega_{пс} \approx (0,95-0,97)\omega_n$, де ω_n номінальна швидкість;

за допомогою регулювання збудження на статорі генератора встановлюється напруга, що дорівнює напрузі мережі;

контролюється виконання наступних умов, після яких синхронний генератор підключається статорною обмоткою до мережі.

Такими умовами включення в мережу синхронного генератора способом точної синхронізації є:

однаковий порядок чергування фаз синхронного генератора, з порядком чергування фаз електричної мережі;

рівність за абсолютними значеннями напруги генератора U_G , що вмикається, й напруги мережі U_M ;

рівність кутової швидкості обертання, що вмикається, ω (або частоти f_G) генератора, що вмикається, кутової швидкості ω_M (або частоти f_M) електричної мережі;

співпадання по фазі векторів напруги генератора U_r й напруги мережі в момент замикання контактів вимикача.

Виконання вказаних умов забезпечує включення генератора в мережу без стрибка зрівнюючого струму, активної потужності та моменту на валу генератора.

3. 2. Опис лабораторної установки

Схема S-моделі наведена на рис. 3. 2.

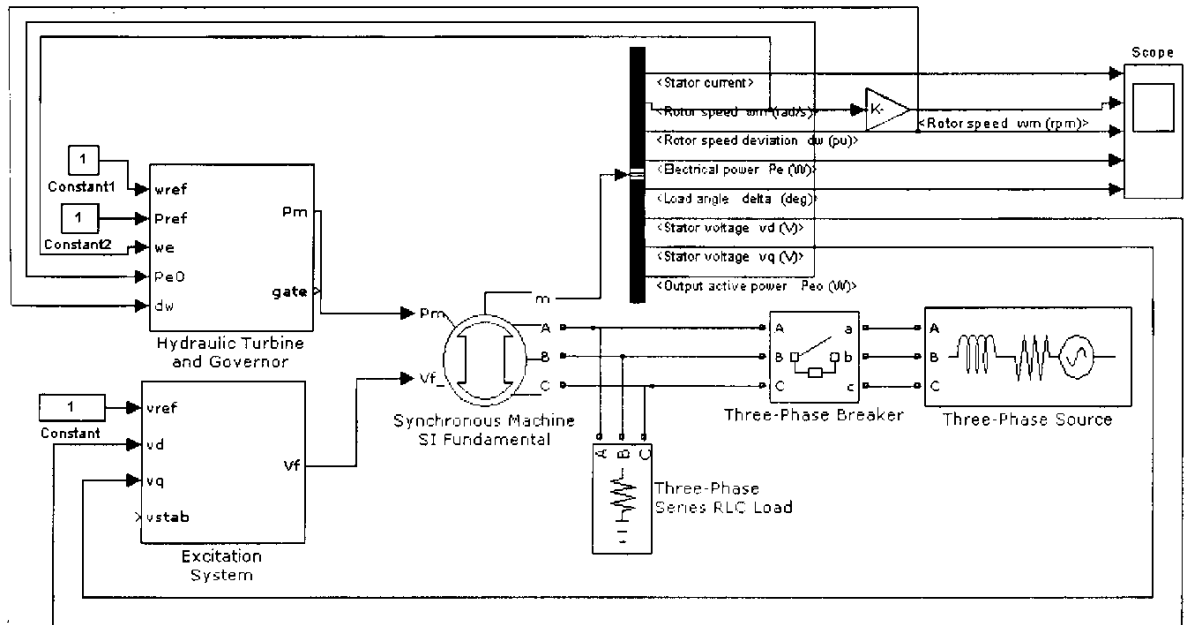


Рис. 3. 2 Схема імітаційної моделі гідроагрегату.

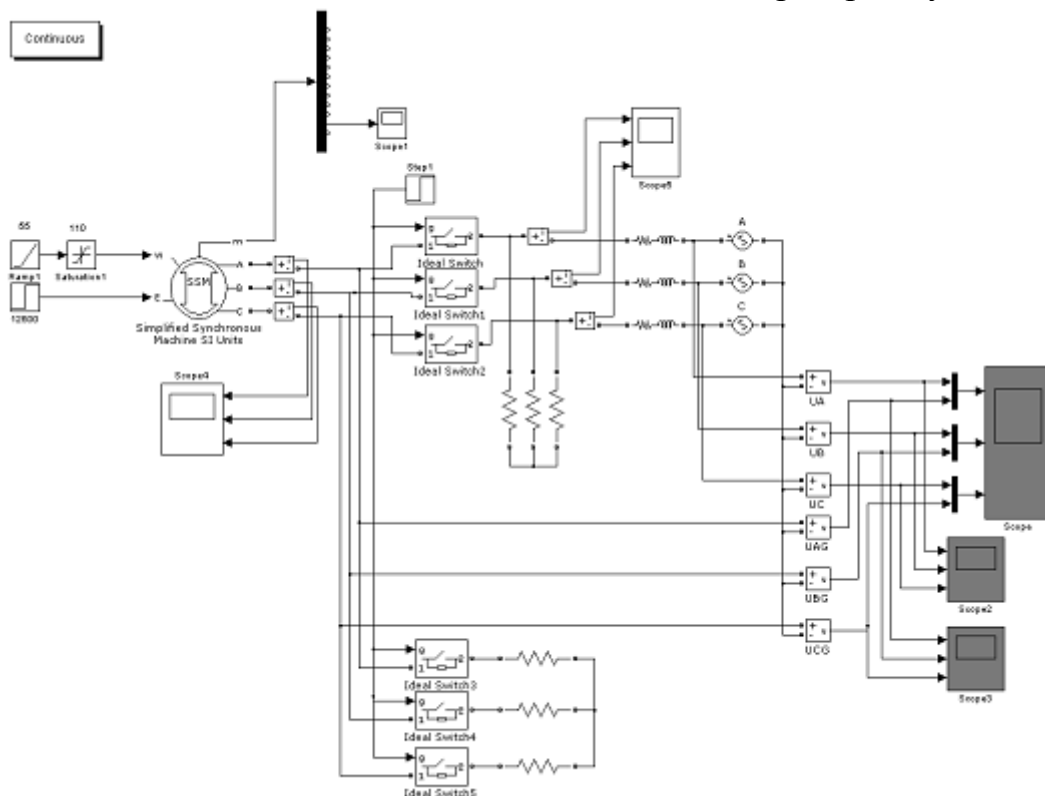


Рис. 3. 3 Схема дослідження синхронізації генератора з мережею.

3. 3. Зміст роботи

1. Зібрати й налагодити схему експериментальної моделі.
2. Провести дослід включення навантаження з інерційним збудженням.
3. Провести дослід підключення номінального навантаження з технологічною затримкою ступінчатого збудження.
4. Дослідити вплив форсування збудження на динаміку перехідного процесу.

3. 4. Вказівки до виконання роботи

Провести дослід пуску СГ з інерційними та неінерційними впливами збудження, побудувати залежності електромагнітних та електромеханічних процесів $\omega(t)$, $M(t)$, $i_{SA}(t)$, $u_{SA}(t)$ для режиму розгону.

Побудувати залежності амплітуди S_{sm} , активної потужності $P(t)$, реактивної потужності $Q(t)$, напруги $u_{SA}(t)$ від різних значень збудження ротора синхронного генератора. При цьому табличний ряд заданих значень напруги збудження U_3 дорівнює: $0,5 U_H$; $0,6 U_H$; $0,6 U_H$; $0,7 U_H$; $0,8 U_H$; $0,9 U_H$; $1,0 U_H$; $1,1 U_H$.

Провести дослід підключення мережі нескінченної потужності (з синхронізацією) в сталому режимі роботи та дослідження залежності вихідної напруги u_A генератора при зміні напруги U_3 збудження генератора (від 50% до 150% від її номінального значення U_{sm}) та навантаження регулятором швидкості.

Провести аналіз та обробку отриманих даних.

3. 5. Порядок виконання роботи

Виконання роботи починається складанням схеми моделі. Провести дослід згідно змісту та вказівок до виконання. Результати занести до таблиць. Одержані часові діаграми скопіювати до звіту.

3. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
- Короткий опис. Схема і умови експерименту;
- План і дані досліджень;
- Обробка результатів. Характеристики і графіки;
- Висновки і рекомендації.

Контрольні питання

1. Динамічні складові генерації та ознаки.
2. Статична стійкість генерації, її ознаки.
3. Показники динамічної стійкості.
4. Вплив інерційності регуляторів на динамічні показники.
5. Форсування збудження та діючі обмеження.

Лабораторна робота № 4

Дослідження симетричного КЗ

Мета роботи: дослідження характеристик симетричних КЗ.

4.1. Короткі теоретичні відомості

Симетричне коротке замикання (КЗ) у трифазній системі є одним з найважчих аварійних динамічних режимів, що безпосередньо впливає на функціональну здатність енергетичного обладнання й системи генерації.

Перехідний процес у такому ланцюзі розглядається за умови, що він живиться від джерела нескінченної потужності. Внутрішній опір такого джерела дорівнює нулю, напруга й частота на його шинах незмінні в будь-якому режимі приєднаного електричного ланцюга. Нерозгалужений трифазний ланцюг, живлений від джерела нескінченної потужності представлений на рис. 4. 1.

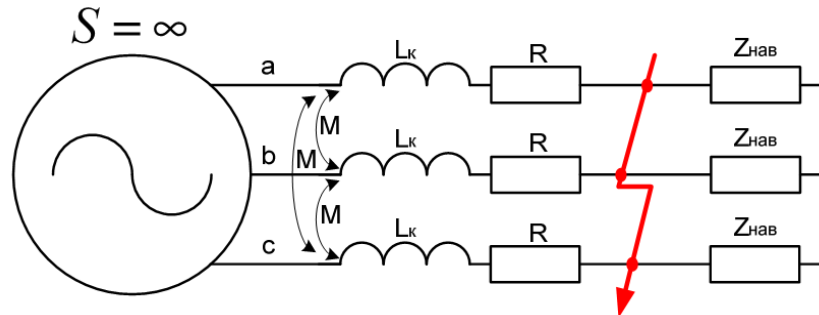


Рис. 4. 1 Симетричне КЗ трифазного нерозгалуженого ланцюга.

З погляду симетрії процесу можливе визначення його параметрів за однією фазою. Рівняння рівноваги напруги для фази "А" становить:

$$u_a = R \times i_a + L_K \times \frac{di_a}{dt} + M \times \frac{di_b}{dt} + M \times \frac{di_c}{dt} .$$

Оскільки розглядається трифазне КЗ, то виконується наступна умова:

$$i_a + i_b + i_c = 0 .$$

Одержимо звичайне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами.

$$u_a = R \times i_a + (L_K - M) \times \frac{di_a}{dt} = R \times i_a + L \times \frac{di_a}{dt} .$$

Рішення такого рівняння містить вимушену (періодичну) і вільну (аперіодичну) складові:

$$i_K = i_{II} + i_A .$$

У короткозамкненому контурі $\omega L \gg R$, тобто час $t \approx 0,01$ с відповідає величині максимального ударного струму КЗ безпосередньо залежить від амплітуди періодичної складової струму КЗ I_{MK} і постійної часу Ta короткозамкненого контуру.

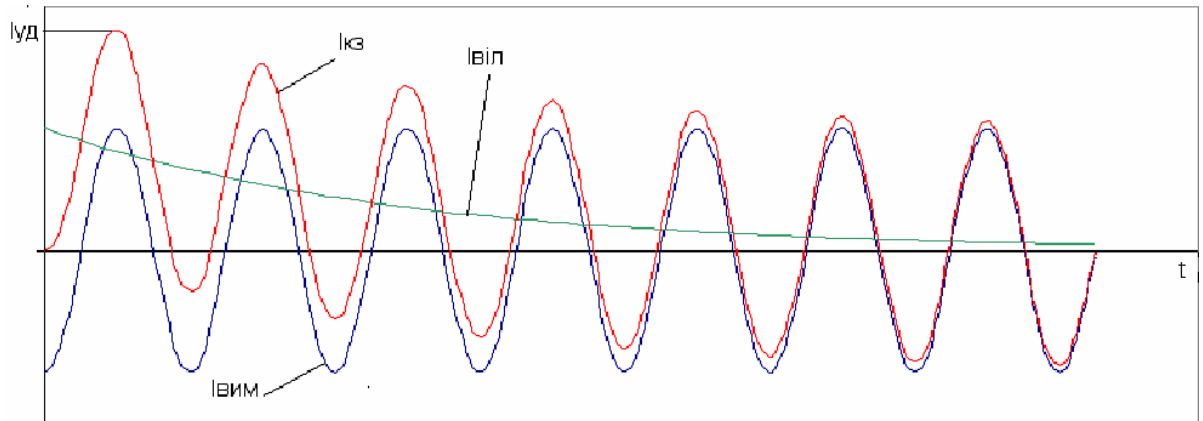


Рис. 4. 2 Графіки струмів за фазами КЗ

У контурі, приєднаному до джерела нескінченної потужності перехідний процес характеризується тільки зміною вільної складової. Періодична складова незмінна.

Якщо розглядати гідрогенератор як джерело, що має внутрішній опір й обмежену потужність, то в перехідному процесі змінюється не тільки вільна складова струму, але й вимушена в результаті того що змінюється потік поздовжньої реакції статора й працює автоматичний регулятор збудження (АРЗ). На рис. 4. 3 представлена зміна напруги генератора й струму збудження залежно від величини зовнішнього опору X_3 (опір між місцем КЗ і генератором) в усталеному режимі КЗ.

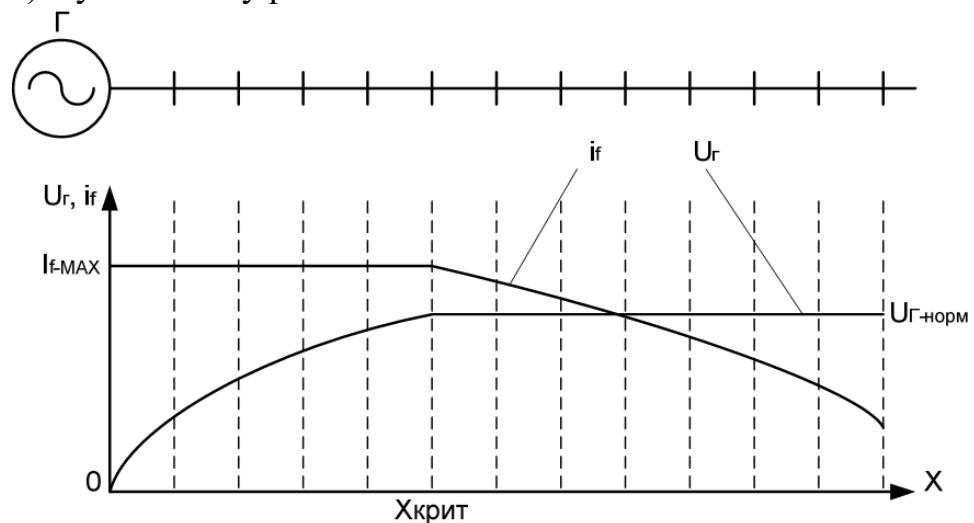


Рис. 4. 3 Залежність напруги генератора й струму збудження від зовнішнього опору

При більших значеннях зовнішнього опору X_3 АРЗ генератора здатний підняти напругу генератора до номінальної, а за малих, - ні. Значення зовнішнього опору, при якому відбувається перехід від сталого аварійного режиму зі збереженням номінальної напруги генератора до сталого аварійного режиму з максимальним збудженням, називають критичним $X_{\text{КРИТ}}$. При цьому справедливі співвідношення:

- 1) режим максимального (граничного) збудження: $I_f = I_{f \text{ MAX}}$, $U_G < U_{\text{НОРМ}}$, $X_3 < X_{\text{КРИТ}}$;
- 2) режим нормальної напруги: $I_f < I_{f \text{ MAX}}$, $U_G = U_{\text{НОРМ}}$, $X_3 > X_{\text{КРИТ}}$;

3) критичний режим: $I_f = I_{fMAX}$, $U_G = U_{НОРМ}$, $X_3 = X_{КРИТ}$.

4. 2. Опис лабораторної установки

Схема S-моделі або/та M-моделі складається за принциповою схемою.

4. 3. Зміст роботи

1. Зібрати й налагодити схему експериментальної моделі.
2. Провести дослід симетричного КЗ в системі нескінченої потужності.
3. Провести дослід симетричного КЗ в системі обмеженої потужності.

4. 4. Вказівки до виконання роботи

Провести дослід симетричного КЗ в системі нескінченої потужності. Визначити значення величини максимального ударного струму КЗ за часом $t \approx 0,01$ с, вільну й вимушену складові процесу.

Провести дослід симетричного КЗ в системі обмеженої потужності. Визначити значення величини максимального ударного струму КЗ за часом $t \approx 0,01$ с, вільну й вимушену складові процесу.

Побудувати графіки залежності напруги генератора й струму збудження від зовнішнього опору, визначити $X_{КРИТ}$.

Провести аналіз отриманих даних.

4. 5. Порядок виконання роботи

Виконання роботи починається складанням схеми моделі. Провести дослід згідно змісту та вказівок до виконання. Результати занести до таблиць. Одержані часові діаграми скопіювати до звіту.

4. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
- Короткий опис. Схема і умови експерименту;
- План і дані досліджень;
- Обробка результатів. Характеристики і графіки;
- Висновки і рекомендації.

Контрольні питання

1. Основні параметри й характеристики симетричного КЗ
2. Особливості симетричного КЗ в системі нескінченої потужності.
3. Особливості симетричного КЗ в системі обмеженої потужності.
4. Вплив збудження на симетричне КЗ в системі обмеженої потужності.
5. Ознаки критичного режиму КЗ за обмеженої потужності.

Лабораторна робота № 5

Дослідження несиметричних КЗ

Мета роботи: дослідження характеристик несиметричних КЗ.

5. 1. Короткі теоретичні відомості

Несиметричне коротке замикання (КЗ) у трифазній системі є одним з важких аварійних динамічних режимів, що безпосередньо впливає на функціональну здатність енергетичного обладнання й системи генерації.

У реальних умовах більшість аварійних режимів супроводжуються порушенням симетрії трифазної системи, що виражається в нерівності абсолютних значень електричних параметрів по фазах й/або відмінністю кутів між фазами від 120° . Відомо, що будь-яку несиметричну систему трьох векторів можна однозначно розкласти на три симетричних системи, рис. 5. 1: прямої, зворотної й нульової послідовностей

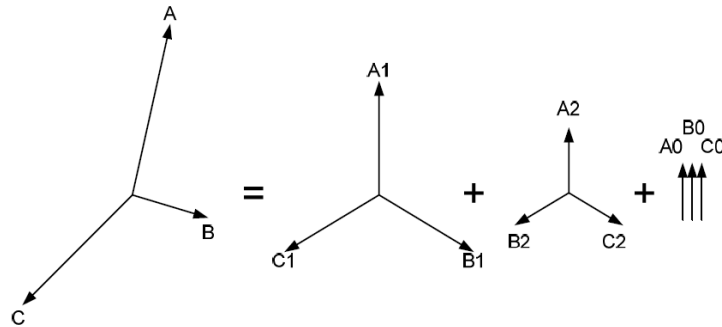


Рис. 5. 1 Розкладання несиметричної системи на три симетричні.

Будь який з векторів трифазної симетричної системи можливо представити через інший вектор, використовуючи оператор повороту $a = e^{j120^\circ}$. При цьому справедливе співвідношення:

$$1+a+a^2 = 1+e^{j120^\circ} + e^{j240^\circ} = 1+(-0,5+j 0,866)+(-0,5 -j 0,866) = 0.$$

Оператор повороту використовують для визначення симетричних складових несиметричного режиму

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_0; \\ B &= a^2 A_1 + a A_2 + A_0; \\ C &= a A_1 + a^2 A_2 + A_0. \end{aligned}$$

Всі види несиметричних КЗ в одній точці системи відносяться до видозмін однократної поперечної несиметрії. Сюди відносяться й включення несиметричних навантажень. Передбачається, що періодична складова струму несиметрії містить тільки основну гармоніку. Вищі гармоніки не враховуються. Тоді будь який режим можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} E_A &= U_{A1} + I_{A1} Z_{1e}; \\ 0 &= U_{A2} + I_{A2} Z_{2e}; \\ 0 &= U_{A0} + I_{A0} Z_{0e}; \\ U_A &= U_{A1} + U_{A2} + U_{A0}; \\ U_B &= a^2 U_{A1} + a U_{A2} + U_{A0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_C &= a U_{A1} + a^2 U_{A2} + U_{A0} ; \\
 I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} ; \\
 I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0} ; \\
 I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0} .
 \end{aligned}$$

Ця система містить 12 невідомих в 9 рівняннях. Щоб одержати її рішення, визначити струми й напруги аварійного режиму та їх складові необхідно додати ще три рівняння, які будуть характеризувати конкретний вид ушкодження.

Наслідком методу симетричних складових є наступне правило: будь-який несиметричний режим можна представити схемою заміщення симетричного режиму (прямої послідовності) у якій місце КЗ віддалене від реального на аварійний шунт ΔZ , величина якого визначається видом КЗ, а реальний струм КЗ визначається як добуток отриманого струму КЗ прямої послідовності на множник m .

У випадку двофазного КЗ дві фази з'єднані між собою, третя фаза неушкоджена, а струм у ній приймається рівним нулю. За цих умов можна скласти такі три рівняння для КЗ фаз В і С:

$$\begin{aligned}
 U_B &= U_C ; \\
 I_A &= 0 ; \\
 I_B + I_C &= 0 .
 \end{aligned}$$

Така система рівнянь (12+3) вирішується в наступний спосіб: з рівняння 5, віднімається рівняння 6:

$$U_B - U_C = (a^2 - a) U_{A1} + (a - a^2) U_{A2} = 0 \rightarrow U_{A1} = U_{A2} .$$

Складаються рівняння 7, 8, 9:

$$I_A + I_B + I_C = 3I_{A0} = 0 \rightarrow I_{A0} = 0 .$$

З врахуванням цього, з рівняння 3 одержуємо:

$$0 = U_{A0} + 0 Z_{0e} = U_{A0} .$$

З рівняння 7 можливо одержати:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = I_{A1} + I_{A2} + 0 = 0 \rightarrow I_{A1} = -I_{A2} .$$

Якщо з рівняння 1 відняти рівняння 2 одержимо:

$$\begin{aligned}
 E_A - 0 &= U_{A1} + I_{A1} Z_{1e} - (U_{A2} + I_{A2} Z_{2e}) = I_{A1} Z_{1e} - (-I_{A1}) Z_{2e} = \\
 &= I_{A1} (Z_{1e} + Z_{2e}) \rightarrow I_{A1} = \frac{E_A}{Z_{1e} + Z_{2e}} .
 \end{aligned}$$

З виразу видно, що аварійний шунт двофазного КЗ рівняється еквівалентному опору зворотної послідовності $\Delta Z^{(2)} = Z_{2e}$.

Періодична складова струму двофазного КЗ визначається з рівняння 8:

$$\begin{aligned}
 I_{\Pi 0} &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} = a^2 I_{A1} + a(-I_{A1}) = I_{A1} (a^2 - a) = \\
 &= I_{A1} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -j\sqrt{3} I_{A1} .
 \end{aligned}$$

З виразу також видно, що множник $m^{(2)} = \sqrt{3}$. Комплексна схема заміщення при аналізі двофазного КЗ має вигляд, представлений на рис. 5. 2.

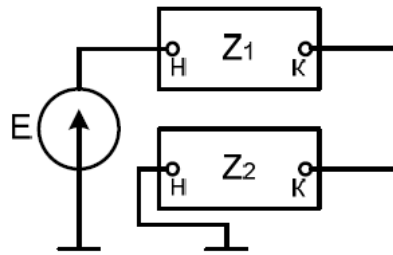


Рис. 5. 2 Комплексна схема заміщення при двофазному КЗ.

5. 2. Опис лабораторної установки

Схема S-моделі або/та M-моделі складається за структурною схемою конкретного виду ушкодження.

Рис. 5. 2 Схема імітаційної моделі СГ.

5. 3. Зміст роботи

1. Зібрати й налагодити схему експериментальної моделі.
2. Провести дослід несиметричного КЗ за завданням в системі нескінченної потужності.
3. Провести дослід несиметричного КЗ за завданням в системі обмеженої потужності.

5. 4. Вказівки до виконання роботи

Розрахувати необхідні параметри схеми для заданого виду несиметричного КЗ та аварійних шунтів.

Провести дослід несиметричного КЗ в системі нескінченної потужності. Визначити значення величини максимального ударного струму КЗ за часом $t \approx 0,01$ с, вільну й вимушену складові процесу.

Провести дослід несиметричного КЗ в системі обмеженої потужності. Визначити значення величини максимального ударного струму КЗ за часом $t \approx 0,01$ с, вільну й вимушену складові процесу.

Визначити графіки зміни напруги генератора й струму.

Провести аналіз отриманих даних.

5. 5. Порядок виконання роботи

Виконання роботи починається з розрахунку необхідних параметрів та складанням схеми моделі. Провести дослід згідно змісту та вказівок до виконання. Результати занести до звіту. Одержані часові діаграми скопіювати до звіту.

5. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
- Короткий опис. Схема і умови експерименту;
- План і дані досліджень;
- Обробка результатів. Характеристики і графіки;

- Висновки і рекомендації.

Контрольні питання

1. Основні ознаки й характеристики несиметричних КЗ.
2. Особливості несиметричного КЗ в системі нескінченної потужності.
3. Особливості несиметричного КЗ в системі обмеженої потужності.
4. Основа методу симетричних складових.
5. Поняття, види й зміст аварійних шунтів.

Література

1. Глебов И. А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Л.: Наука, 1988. - 332 с.
2. Глебов И. А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин. – Л.: Наука, 1987. - 344 с.
3. Радченко В. В. Процеси в системах збудження гідрогенераторів. Монографія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 248 с.
4. Радченко В. В. Спосіб визначення відхилення змінної величини від встановленого рівня. G 01 R 19/22. Пат. України, № 68900, від 10. 04. 2012, Бюл. №7. – 7 с.
5. Радченко В. В. Вилив інерційності системи збудження на динамічні якості гідрогенератора. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 90, 2013 р. С. 119 – 125.
6. Радченко В. В. Безінерційне виміювання відхилень змінних процесів. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 91, 2013 р. С. 73 – 78.
7. Радченко В. В. Можливості модернізації системи збудження гідрогенератора. Вісник НУВГП, вип. 2 (62) – Рівне: НУВГП, 2013. - с. 262 - 275.
8. Радченко В. В. Форсування збудження й динаміка перехідного процесу гідрогенератора. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 92, 2014 р. С. 83 – 90.
9. Радченко В. В. Підвищення динамічної ефективності системи збудження гідрогенератора. Вісник НУВГП, вип. 2 (62) – Рівне: НУВГП, 2015. - с. 240-244.
10. Радченко В. В. Гідроелектродинамічна робоча складова гідроагрегату ГЕС. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 94, 2015. с. 111-122
11. Літвінов В. В. Електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси. – Запоріжжя: ЗДІА, 2015. – 130 с.